

AUTOMATISIERTE ERKENNUNG UND KARTIERUNG VON LAWINENABLAGERUNGEN MIT OPTISCHEN FERNERKUNDUNGSDATEN

Dissertation

zur

**Erlangung der naturwissenschaftlichen Doktorwürde
(Dr. sc. nat.)**

vorgelegt der

Mathematisch-naturwissenschaftlichen Fakultät

der

Universität Zürich

von

Yves A. Bühler

von/aus

Adliswil ZH

Promotionskomitee

Prof. Dr. Klaus I. Itten (Vorsitz)

Dr. Tobias W. Kellenberger (Leitung der Dissertation)

Dr. Urs Frei

Zürich, 2009

Zusammenfassung

Lawinen bedrohen Gebäude sowie Verkehrsinfrastruktur im Alpenraum. Sie fordern in der Schweiz mehr Todesopfer als jeder andere Typ von Naturkatastrophen. Deshalb sind rasch verfügbare und präzise Informationen über die Lage und Reichweite von Lawinenereignissen wichtig für die Lawinenwarnung und die Entscheidungsfindung bezüglich der Sperrung von Strassen, Bergbahnen und Skipisten. Für die Evaluation der Gefahrenprognose, für die Erstellung von Kataster und Gefahrenkarten sowie für die Kalibrierung und Evaluation von Lawinenmodellen sind sie ebenfalls von grosser Bedeutung. Heute werden diese Informationen vorwiegend von Beobachtern vor Ort erhoben. Aufgrund der eingeschränkten Zugänglichkeit hochalpiner Gebiete im Winter kann aber nur ein Bruchteil aller Lawinenereignisse erfasst werden. Insbesondere kleinere bis mittlere Lawinenereignisse in abgelegenen Gebieten werden nur sporadisch kartiert. Aber gerade dieser Lawinentyp fordert die meisten Todesopfer unter der steigenden Zahl von Wintersportlern, die sich abseits der markierten Pisten bewegen.

Fernerkundungssensoren können auch über schwer zugänglichem Gebiet grossflächig Daten erheben und sind deshalb ein potentiell Werkzeug, das zur Schliessung dieser Informationslücke beitragen kann. In dieser Arbeit wird systematisch untersucht, inwiefern Lawinenkegel mit räumlich hochauflösenden optischen Fernerkundungsdaten erkannt und kartiert werden können.

Anhand von Feld-Spektorradiometermessungen von neun Lawinenkegeln wird analysiert, ob allgemeingültige, substantielle spektrale Unterschiede zwischen Lawinenkegel und der angrenzenden, ungestörten Schneedecke bestehen. Obwohl interessante Absorptionsfeatures im nahen Infrarotbereich des elektromagnetischen Spektrums identifiziert werden können, sind die Unterschiede kaum ausgeprägt genug, um sie mit flugzeug- oder satellitengestützten Sensoren zu erfassen.

Das direktionale Reflexionsverhalten der rauen Oberfläche eines Lawinenkegels verhält sich konträr zum Reflexionsverhalten der ungestörten Schneedecke. Anhand von Daten des Luftbildscanners ADS40, aufgenommen aus unterschiedlichen Blickwinkeln, kann gezeigt werden, dass dieser Unterschied im Reflexionsverhalten der zwei Schneeoberflächentypen mit grosser Wahrscheinlichkeit genutzt werden kann, um Lawinenkegel zu detektieren. Allerdings reicht der in dieser Untersuchung verfügbare Blickwinkelunterschied von 16° nicht aus, um Lawinenkegel allein auf Basis der direktionalen Unterschiede mit genügender Genauigkeit zu kartieren.

Die Texturen von Lawinenkegeln und der ungestörten Schneedecke unterscheiden sich deutlich. Eine grobe Unterscheidung ist bereits von blossen Auge möglich. Die Statistik zweiter Ordnung, welche die räumliche Verteilung von Intensitätswerten berücksichtigt, kann Texturmerkmale in digitalen Bilddaten quantitativ

erfassen. Dies ist die Voraussetzung für eine automatisierte Erkennung spezifischer Texturen. Anhand von RC30 Luftbildern, aufgenommen während des Lawinenwinters 1999, werden in der Literatur beschriebene Texturmasse auf ihre Eignung für die Unterscheidung zwischen Lawinenkegel und ungestörter Schneedecke getestet. Dabei werden die massgebenden Parameter systematisch variiert, um die optimalen Einstellungen zu identifizieren. Das Texturmass *Entropy* erweist sich als stabilster Indikator für die Differenzierung zwischen rauen und glatten Schneeoberflächen. Weil aber auch weitere raue Schneeoberflächen, wie vom Wind modellierte Schneedecken oder künstlich angehäufter Schnee an Rändern von Skipisten, vergleichbare Texturwerte wie Lawinenkegel zeigen, reichen Texturparameter alleine nicht aus, um Lawinenkegel eindeutig zu identifizieren.

Basierend auf den Erkenntnissen aus den vorangegangenen Untersuchungen wird eine Prozessierungskette entwickelt, welche spektrale und direktionale Parameter mit Texturparametern und Informationen aus Hilfsdatensätzen kombiniert. Diese Prozessierungskette wird anhand von Daten des Luftbildscanners ADS40 im Raum Davos evaluiert und verbessert. Dabei werden 94% der in drei Testgebieten vorhandenen Lawinenkegel vom Algorithmus korrekt erkannt. Auch kleinere Kegel mit einer Fläche von weniger als 2000 m² und Kegel in Schattenhängen werden korrekt erfasst.

Dieses Ergebnis zeigt das grosse Potential des entwickelten Ansatzes für die automatisierte Erkennung und Kartierung von Lawinenkegeln. Die Verfügbarkeit geeigneter Daten ist aber aufgrund der nach intensiven Schneefällen häufigen noch vorhandenen Bewölkung eingeschränkt. Zudem treten vereinzelt Fehlklassifikationen auf. Dies sind hauptsächlich vom Wind modellierte Schneedecken, künstlich angehäufter Schnee und von spärlicher Vegetation durchsetzte Flächen.

Trotz diesen Einschränkungen kann der in dieser Arbeit entwickelte Ansatz in Zukunft zur Schliessung substanzieller Datenlücken beitragen. Besonders in Gebirgen von Entwicklungsländern, in denen noch kaum verlässliche Informationen über Lawinenniedergänge existieren, können damit wertvolle Informationen für die Gefahrenkartierung und die Siedlungsplanung gewonnen werden.

Summary

Snow-avalanches kill more people in Switzerland than any other natural hazard and threaten buildings and traffic infrastructure. Rapidly available and accurate information about the location and extent of avalanche events is important for avalanche forecasting, safety assessments for roads and ski resorts, verification of warning products as well as for hazard mapping and avalanche model calibration/validation. Today, isolated observations from individual experts in the field provide information with limited coverage. Only a fraction of all avalanche events can be recorded due to restricted accessibility of many alpine terrain sections during winter season. Information on small to medium size avalanche events within remote regions is collected only sporadically. However, these avalanches notably claim most casualties within the raising number of people pursuing off-slope activities.

Remote sensing instruments are able to acquire wide-area datasets even over poorly accessible regions. Therefore they are promising tools to close the above-mentioned information gap. This research systematically investigates the potential of spatially high resolved remote sensing instruments for the detection and mapping of snow-avalanche deposits.

Fieldspectroradiometer data of nine avalanche deposits are analysed to identify universally valid and significant spectral offsets between avalanche deposits and the adjacent undisturbed snow cover. Promising absorption features are found in the near infrared region of the electromagnetic spectrum. Nevertheless, the differences are unlikely to be distinct enough for a detection using air- or spaceborne remote sensing instruments.

The directional reflection of rough avalanche deposit surfaces is contrary to the directional reflection of smooth undisturbed snow covers. The potential of multiangular remote sensing data for the detection and mapping of avalanche deposits is demonstrated using multiangular data acquired by the airborne scanner ADS40. However, the difference between observation angles (16°) proves to be insufficient for accurate avalanche detection solely on the base of directional properties. Therefore, auxiliary data has to be utilised.

The texture of avalanche deposits and undisturbed snow cover can already be distinguished by the naked eye. Using second order statistics, comprising the spatial distribution of the variation in pixel brightness, textural characteristics in digital image data can be quantified. This is a prerequisite for an automated detection of particular textures. Different established texture measures are tested for their discriminating potential of avalanche deposits and undisturbed snow cover using RC30 aerial images of avalanche deposits acquired within the avalanche winter 1999 in Switzerland. The control parameters such as the size of the filter box are

systematically varied to find the ideal settings. The texture measure *Entropy* is identified as the most distinct and stable indicator to distinguish between rough and smooth snow surfaces. But avalanche deposits are not the only rough snow surfaces within the Alpine winter landscape. For example wind modelled snow surfaces or artificially piled snow at the edge of roads and ski slopes show texture characteristics similar to avalanche deposits. Consequently, a classification approach using texture information only is not sufficient for an accurate identification of avalanche deposits.

Based on the findings described above, we develop an avalanche detection and mapping processing chain, combining spectral, directional and textural parameters with auxiliary datasets. The processing chain is tested and improved using data acquired by the airborne scanner ADS40 over the region of Davos, Switzerland. The accuracy assessment, based on ground reference data within three test sites, shows that 94% of all existing avalanche deposits are identified. Even small scale deposits (area < 2000 m²) and deposits within shadowed areas are detected correctly.

These results demonstrate the big potential of the proposed approach for an automated detection and mapping of avalanche deposits. Yet, cloud cover constrains the availability of appropriate optical remote sensing data after heavy snowfall while wind modelled snow surfaces, artificially piled snow and sparsely vegetated snow surfaces cause sporadic misclassifications.

Despite these constraints, the approach developed within this research shows a big potential to fill existing gaps in avalanche information. Especially within alpine areas of developing countries with almost no reliable information on past avalanche events, such an approach may be used to acquire valuable data for hazard mapping and settlement planning.

Inhaltsverzeichnis

ZUSAMMENFASSUNG	-----	III
SUMMARY	-----	V
INHALTSVERZEICHNIS	-----	VII
ABBILDUNGSVERZEICHNIS	-----	X
TABELLENVERZEICHNIS	-----	XV
GLOSSAR	-----	XVII
DANK	-----	XIX
KAPITEL 1		
EINLEITUNG	-----	1
1.1.	Problemstellung -----	1
1.2.	Zielsetzung der Arbeit -----	2
1.3.	Motivation -----	2
1.4.	Aufbau der Arbeit -----	4
KAPITEL 2		
LAWINEN - NATURKATASTROPHEN IM ALPINEN GELÄNDE	-----	6
2.1.	Naturkatastrophen – ein weltweiter Überblick -----	6
2.2.	Naturkatastrophen im Schweizer Alpenraum -----	8
2.3.	Lawinen im Schweizer Alpenraum -----	11
2.3.1.	Lawinentypen und ihre Entstehung -----	11
2.3.2.	Lawinenopfer -----	16
2.3.3.	Schäden an Gebäuden und Infrastrukturen -----	17
2.3.4.	Der Lawinenwinter 1999 -----	17
KAPITEL 3		
ERHEBUNG VON LAWINENRELEVANTEN PARAMETERN MIT		
FERNERKUNDUNGSDATEN	-----	18
3.1.	Einleitung -----	18
3.2.	Gelände -----	18
3.2.1.	Hangneigung -----	18
3.2.2.	Exposition und Höhenlage -----	20
3.2.3.	Geländeformen -----	20
3.2.4.	Oberflächenrauigkeit -----	21
3.3.	Wetter und Klima -----	21
3.3.1.	Niederschlag -----	22
3.3.2.	Wind -----	23
3.3.3.	Lufttemperatur und Luftfeuchtigkeit -----	24
3.3.4.	Sonneneinstrahlung -----	25
3.4.	Schneedecke -----	26
3.4.1.	Räumliche Verteilung der Schneebedeckung -----	26
3.4.2.	Schichtung und Stabilität -----	26
3.5.	Optische Eigenschaften von Schnee -----	27
3.5.1.	Wellenlänge -----	27
3.5.2.	Direktionale Eigenschaften -----	28

3.5.3.	Korngrösse und Form -----	29
3.5.4.	Gehalt an freiem Wasser -----	30
3.5.5.	Fremdmaterialgehalt -----	30
3.6.	Kartierung von Lawinenniedergängen -----	31
3.7.	Synthese -----	32
KAPITEL 4		
CHARAKTERISIERUNG DER SPEKTRALEN EIGENSCHAFTEN VON LAWINENABLAGERUNGEN -----		34
4.1.	Einleitung-----	34
4.2.	Hypothese-----	35
4.3.	Datengrundlage-----	35
4.4.	Methoden-----	39
4.4.1.	Vorverarbeitung -----	40
4.4.2.	Statistische Indikatoren -----	40
4.4.3.	Hauptkomponententransformation -----	40
4.4.4.	Continuum removal-----	41
4.5.	Resultate und Diskussion-----	43
4.5.1.	Statistische Indikatoren-----	43
4.5.2.	Hauptkomponententransformation -----	45
4.5.3.	Continuum removal-----	46
4.6.	Schlussfolgerungen -----	48
KAPITEL 5		
CHARAKTERISIERUNG DER DIREKTIONALEN EIGENSCHAFTEN VON LAWINENABLAGERUNGEN -----		50
5.1.	Einleitung-----	50
5.2.	Grundlagen-----	51
5.2.1.	Bi-directional reflectance distribution function BRDF -----	51
5.2.2.	Rückschlüsse auf die Oberflächenrauigkeit von schneebedeckten Oberflächen-----	53
5.3.	Direktionale Eigenschaften von Lawinenablagerungen und der ungestörten Schneedecke -----	54
5.3.1.	BRDF-Effekte der ungestörten Schneedecke -----	55
5.3.2.	BRDF-Effekte von Lawinenkegeln -----	55
5.4.	Hypothese-----	58
5.5.	Anwendung -----	58
5.5.1.	Datengrundlage -----	58
5.5.2.	Untersuchung des Reflexionsverhaltens von Lawinenkegeln, in Abhängigkeit des Blickwinkels -----	59
5.6.	Schlussfolgerungen -----	64
KAPITEL 6		
CHARAKTERISIERUNG DER TEXTUREIGENSCHAFTEN VON LAWINENABLAGERUNGEN -----		66
6.1.	Einleitung-----	66
6.2.	Grundlagen der Texturanalyse-----	68
6.2.1.	Statistik erster Ordnung: Histogramm-Analyse -----	69
6.2.2.	Statistik zweiter Ordnung: Texturmasse nach Haralick -----	71
6.3.	Charakteristische Textur von Lawinenkegeln -----	75
6.4.	Hypothese-----	80
6.5.	Datengrundlage-----	80
6.5.1.	Skalierung der Luftbilddaten-----	83
6.6.	Methode -----	83
6.6.1.	Mass für die Unterscheidbarkeit der Klassen -----	85

6.7.	Resultate und Interpretation -----	86
6.7.1.	Statistik erster Ordnung -----	86
6.7.2.	Statistik zweiter Ordnung -----	90
6.8.	Schlussfolgerungen -----	105
KAPITEL 7		
ANWENDUNG: AUTOMATISIERTE ERKENNUNG UND KARTIERUNG VON LAWINENABLAGERUNGEN IM TESTGEBIET DAVOS -----		107
7.1.	Einleitung-----	107
7.2.	Hypothese-----	108
7.3.	Untersuchungsgebiet -----	108
7.4.	Daten-----	109
7.4.1.	Sensor ADS40 SH52-----	109
7.4.2.	Datenerhebung-----	111
7.4.3.	Datenvorverarbeitung -----	113
7.4.4.	Referenzdaten -----	114
7.5.	Methoden-----	115
7.5.1.	Ausmaskieren der nicht lawinengefährdeten Gebiete -----	115
7.5.2.	Nutzung multidirektionaler Reflexionseigenschaften -----	117
7.5.3.	Texturanalyse von NDAI-Daten -----	117
7.5.4.	Objekt-orientierte Klassifikation-----	118
7.6.	Resultate und Diskussion-----	118
7.6.1.	Genauigkeitsabschätzung -----	123
7.6.2.	Grenzen und Fehlerquellen-----	126
7.7.	Schlussfolgerungen -----	129
KAPITEL 8		
FAZIT UND AUSBLICK -----		131
8.1.	Fazit -----	131
8.1.1.	Charakterisierung der spektralen Eigenschaften -----	131
8.1.2.	Charakterisierung der direktionalen Eigenschaften-----	132
8.1.3.	Charakterisierung der Textureigenschaften -----	132
8.1.4.	Anwendung-----	133
8.2.	Ausblick-----	133
LITERATUR -----		137

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1	Europäische Lawinengefahrenskala mit Empfehlungen (http://www.slf.ch/lawineninfo/zusatzinfos/lawinenskala-europa , Zugriff: 25. 11. 2008).....	4
Abbildung 2	Entwicklung der Anzahl Naturkatastrophen weltweit, aufgegliedert nach Ereignistypen (MunichRe, 2008).....	7
Abbildung 3	Entwicklung der weltweiten Schäden verursacht durch Naturkatastrophen (MunichRe, 2008).....	8
Abbildung 4	Naturkatastrophen in der Schweiz nach Ereignistyp. Die geschätzte durchschnittliche Schadenssumme in der Schweiz beträgt 1,8 Milliarden CHF pro Jahr (BABS, 2003; Jordi, 2007).....	9
Abbildung 5	Illustration der wichtigsten Lawinentypen an Beispielen aus der Region Davos. A) Lockerschneelawine, B) Schneebrettlawine, C) Staublawine, D) Nassschneelawine. Fotografien: A) Y. Bühler, B) A. Hüni, C) SLF, D) R. Meister.....	13
Abbildung 6	Unterschiedliche Zonen einer Lawine, illustriert am Beispiel einer Schneebrettlawine mittlerer Grösse in der Region Parsenn, Davos.....	14
Abbildung 7	Messstationen des Bundesamtes für Meteorologie und Klimatologie MeteoSchweiz (MeteoSchweiz, 2008a).....	23
Abbildung 8	Mächtige Wächten, entstanden durch die Ablagerung von Tribschnee am Gipfelgrat der Mont Blanc Gruppe (www.top-wetter.de , Zugriff: 22. 07. 2008).....	24
Abbildung 9	Nahaufnahme von Oberflächenreif abgelagert durch Sublimation nach einer kalten Nacht mit hoher relativer Luftfeuchtigkeit (links) und Becherkristalle aus einer unteren Schicht der Schneedecke (www.avalanche.org/~uac/encyclopedia , www.avalanche.org/~nai/knowledge_base.htm , Zugriff: 22. 07. 2008)	25
Abbildung 10	Spektrale Eigenschaften von Schnee und Eis (Hall und Martinec, 1985).....	28
Abbildung 11	Goniometer-Messung der Reflektanz von Neuschnee bei einer Wellenlänge von 1300 nm. Das <i>forwardscattering</i> in der Sonnenhauptebene ist deutlich sichtbar, modifiziert nach (Rey, 2008)	29
Abbildung 12	Spektralkurven der Reflektanz von Schnee, abhängig von der Korngrösse (Painter, 2002).....	30
Abbildung 13	Räumliche Verteilung und Identifikationsnummern der beprobten Lawinenkegel. Reproduziert mit Bewilligung von swisstopo (BA091356)	36
Abbildung 14	Fotografien der untersuchten Lawinenablagerungen (Fotografien A. Hüni, Y. Bühler, R. Meister).....	38
Abbildung 15	Reflektanzspektren der untersuchten Lawinenkegel (rot) und der angrenzenden, ungestörten Schneedecke (blau). Bei Lawine Nummer 7 sind zusätzlich in Grün Spektren des stark verschmutzten Teils des Lawinenkegels abgebildet (7 _b vgl. Abbildung 14, S. 38). X-Achse = Wellenlänge, Y-Achse = Reflektanz	39
Abbildung 16	Korrelation aller Stichproben über die gemessenen 2151 Spektralkanäle	41

Abbildung 17	<i>Continuum removal</i> mit erzwungenen Berührungspunkten. Die interessanten Absorptionsfeatures liegen bei A) 1020 nm, B) 1220 nm, C) 1500 nm. Das Absorptionsfeature bei ca. 2000 nm wurde aufgrund der atmosphärischen Störungen nicht berücksichtigt (Treichler, 2009).	42
Abbildung 18	Mittelwert und Varianz der Spektren von Lawinenkegeln und dem angrenzenden, ungestörten Schnee. Bei Lawine Nummer 7 sind in Grün auch die Werte für die Spektren des verschmutzten Teiles der Lawine abgebildet (7 _b). X-Achse = Wellenlänge, Y-Achse links = Reflektanz, Y-Achse rechts = Varianz	44
Abbildung 19	Ergebnis der Hauptkomponententransformation für die Stichproben der Lawinenkegel (rot, AVAL) und der ungestörten Schneedecke (blau, UNDI). Die in Kapitel 4.3 definierten Lawinentypen sind klar gruppiert.	45
Abbildung 20	Trennbarkeit der Lawinenkegel (rot) von der angrenzenden ungestörten Schneedecke (blau) anhand der ersten beiden Hauptkomponenten für die neun getesteten Lawinen.	46
Abbildung 21	Stichproben der verschiedenen Lawinentypen und der ungestörten Schneedecke abhängig von den am besten zur Trennung geeigneten Absorptionsfeatures (Treichler, 2009).	47
Abbildung 22	An der Oberfläche eines Lawinenkegels treten aufgrund der rauen Topographie auf kleinem Raum directionale Effekte wie Schattenwurf und spekulare Reflexion auf (Fotografien A. Hüni, Y. Bühler)	51
Abbildung 23	Einstrahlungs- und Beobachtungswinkel welche die BRDF bestimmen (Briottet, 2004)	52
Abbildung 24	Nadelwald betrachtet aus unterschiedlichen Blickrichtungen. Links: Sonne im Rücken, Mitte: Nadir, Rechts: gegen die Sonne (Sandmeier, 2004).	53
Abbildung 25	Richtungsabhängige Reflektanz von zwei Schneetypen relativ zur Spektralreferenzmessung im Nadir für die Wellenlänge 860 nm. Neuschnee (A) und alter Nassschnee (B) (Rey, 2008)	55
Abbildung 26	Kegel von Schneebrettlawinen welche einmal heller (A) und einmal dunkler (B) erscheinen als die angrenzende, ungestörte Schneedecke (Fotografien: R. Meister)	56
Abbildung 27	Skizze zur Veranschaulichung der BRDF-Effekte auf einem Lawinenkegel. Bei vorwärts gerichteter Blickrichtung (A) sind vorwiegend die beleuchteten Regionen des Kegels im Blickfeld des Sensors. Bei Nadir-Blickrichtung (B) sind sowohl beleuchtete wie beschattete Regionen im Blickfeld und bei rückwärts gerichteter Blickrichtung (C) sind vorwiegend die beschatteten Regionen sichtbar	56
Abbildung 28	BRDF-Effekte von Lawinenkegeln und der ungestörten Schneedecke festgehalten im Dischmatal, Davos, Aufnahmedatum: 27. 04. 2008. Fotografien: A. Hüni, Kartenausschnitt reproduziert mit Bewilligung von swisstopo (BA091356)	57
Abbildung 29	Lawinenkegel abgebildet im ADS40 Nahinfrarotkanal aufgenommen aus dem Nadir-Blickwinkel (A), aus dem Blickwinkel 16° rückwärts (B) und das Differenzbild aus diesen zwei Kanälen (C)	59
Abbildung 30	Lawinenkegel mit kleinen Ablagerungselementen (A) und mit sehr grossen Ablagerungselementen (B, Salezer-Lawine). Fotografien: A) Y. Bühler, B) A. Hüni	60
Abbildung 31	Übersicht der Stichproben aus den Testgebieten Dorfberg (A), Casanna (B) und Hauptertälli (C). Kartenausschnitt reproduziert mit Bewilligung von swisstopo (BA091356)	61

Abbildung 32	Darstellung der NDAI-Werte für die Stichproben der Lawinenkegel (rot, AVAL) und der ungestörten Schneedecke (blau, UNDI) für das Testgebiet Dorfberg abhängig von der Exposition	62
Abbildung 33	Darstellung der NDAI-Werte für die Stichproben der Lawinenkegel (rot, AVAL) und der ungestörten Schneedecke (blau, UNDI) für das Testgebiet Hauptertälli abhängig von der Exposition	63
Abbildung 34	Darstellung der NDAI-Werte für die Stichproben der Lawinenkegel (rot, AVAL) und der ungestörten Schneedecke (blau, UNDI) für das Testgebiet Casanna abhängig von der Exposition	64
Abbildung 35	Luftbildscanner-Aufnahmen (ADS40) von frischen Lawinenkegeln und der angrenzenden, ungestörten Schneedecke.....	66
Abbildung 36	Unterschiedliche Texturen von Schneeoberflächen in den ADS40 Daten, welche durch die visuelle Wahrnehmung des Menschen gut unterschieden werden können.....	67
Abbildung 37	Beispiel für eine Grey Level Co-occurrence Matrix GLCM in horizontaler Richtung für ein Objekt mit einfacher Textur	71
Abbildung 38	Verwendete Hauptrichtungen für die Berechnung der GLCM mit Abstand ein Pixel (Definiens, 2007)	73
Abbildung 39	Unterschiedliche Texturen von Lawinenkegeln in den ADS40 Daten hervorgerufen durch die Form und Dimension der Ablagerungselemente. A) kleine, rundliche Blöcke, B) grosse, rundliche Blöcke, C) schollenförmige Blöcke. Der Massstab der Bilder ist annähernd identisch.....	77
Abbildung 40	Beispiele für grossmasstäbliche Texturen von Schnee. A) vom Wind geformte Sastrugi, B) durch Wind und den Abstrahlungsunterschied zwischen Tag und Nacht entstandene Formen. (Bild A: www.jamd.com , Bild B: SLF, R. Meister)	78
Abbildung 41	Beispiele für Lawinenkegel im Schlagschatten von Gebirgszügen in RC30 Luftbildern.	78
Abbildung 42	Lawinenkegel mit unterschiedlichem Fremdmaterialanteil im Raum Davos (Fotografien A. Hüni).....	78
Abbildung 43	Veränderung der Textur eines Lawinenkegels abhängig vom Bildmassstab. Links Pixelgrösse 0.2 m, Mitte: Pixelgrösse 1 m, Rechts: Pixelgrösse 5 m	79
Abbildung 44	Einordnung der Texturen von Lawinenkegeln (rot) und ungestörter Schneedecke (blau) in das qualitative System nach Tamura et al.(1978) basierend auf der Einschätzung des Autors	79
Abbildung 45	Lokalisierung der Untersuchungsgebiete. Reproduziert mit Bewilligung von swisstopo (BA091356)	81
Abbildung 46	Beispiel für die manuelle Verteilung der Stichproben. Klasse AVAL (rot) und Klasse UNDI (blau), Ausschnitt Luftbild Nummer 2854 Evolène VS.	84
Abbildung 47	Beispiele für die drei in den Luftbilddaten vorkommende Kegeltypen aus der Region Evolène (A), Goms (B) und Elm (C).....	85
Abbildung 48	Variation der Filterboxgrösse, exemplarisch für zwei Texturmasse erster Ordnung und Trennbarkeitsanalyse für die Texturmasse abhängig von der Filterboxgrösse	87
Abbildung 49	Trennbarkeitsanalyse für die untersuchten Texturmasse erster Ordnung für nicht überschneite Lawinenkegel (Typ A), überschneite Lawinenkegel (Typ B) und Kegel im Schatten (Typ C), Kantenlänge der Filterbox 25 Pixel.....	88

Abbildung 50	Darstellung der Werte für die Standardabweichung (A) und das Original Luftbild zum Vergleich (B) bei einer Kantenlänge der Filterbox von 25 x 25 Pixeln. Helle Gebiete in A bezeichnen hohe Werte, dunkle Gebiete tiefe Werte.....	89
Abbildung 51	Variation der Filterboxgrösse exemplarisch für drei Texturmasse (<i>Contrast</i> , <i>Entropy</i> und <i>Correlation</i>) zur Bestimmung des optimalen Wertebereichs und Trennbarkeitsanalyse, abhängig von der Filterboxgrösse für die Texturmasse mit hohem Trennbarkeitspotential	91
Abbildung 52	Variation der Richtung exemplarisch für drei Texturmasse (<i>Contrast</i> , <i>Entropy</i> und <i>Correlation</i>) zur Bestimmung des optimalen Wertebereichs und Trennbarkeitsanalyse der Stichprobenklassen abhängig von der Richtung.	92
Abbildung 53	Variation der Distanz exemplarisch für drei Texturmasse (<i>Contrast</i> , <i>Entropy</i> und <i>Correlation</i>) zur Bestimmung des optimalen Wertebereichs und Trennbarkeitsanalyse der Stichprobenklassen, abhängig von der Distanz.....	93
Abbildung 54	Trennbarkeitsanalyse für die untersuchten GLCM-Texturmasse für nicht überschneite Lawinenkegel. Verteilung der Stichproben der Klassen AVAL (schwarz) und UNDI (blau) im zweidimensionalen Merkmalsraum für Masse mit einem hohen Trennbarkeitspotential (A) und mit einem geringen Trennbarkeitspotential (B)	95
Abbildung 55	Trennbarkeitsanalyse für die untersuchten GLCM-Texturmasse für überschneite Lawinenkegel. Verteilung der Stichproben der Klassen AVAL (schwarz) und UNDI (blau) im zweidimensionalen Merkmalsraum für Masse mit einem hohen Trennbarkeitspotential (A) und mit geringem Trennbarkeitspotential (B)	96
Abbildung 56	Trennbarkeitsanalyse für die untersuchten GLCM-Texturmasse für Lawinenkegel im Schatten. Verteilung der Stichproben der Klassen AVAL (schwarz) und UNDI (blau) im zweidimensionalen Merkmalsraum für Masse mit einem hohen Trennbarkeitspotential (A) und mit einem geringen Trennbarkeitspotential (B).....	97
Abbildung 57	Trennbarkeitsanalyse für die untersuchten GLCM-Texturmasse auf den 30cm Luftbildern für die Filterboxgrössen 11 und 25 Pixel. Zweidimensionaler Merkmalsraum für Masse mit einem hohen Trennbarkeitspotential für die Kantenlänge der Filterbox von 11 (A) und 25 Pixel (B)	98
Abbildung 58	Durch visuelle Interpretation der Luftbilder erstellte Bodenreferenz (A) und Klassifikation der Schneeoberflächenrauigkeit, basierend auf dem Mass <i>Entropy</i> im Testgebiet Evolène VS (B). Gebiete, bei denen die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten von Lawinenablagerungen sehr gering ist, wurden vorgängig mit Hilfe von Zusatzinformationen ausmaskiert (z.B. sehr steiles Gelände, Wald etc.).....	100
Abbildung 59	Trennbarkeitsanalyse für die GLCM Texturmasse für die Klassen Lawinenkegel (AVAL) und Störobjekte (DIST) wie Siedlungsgebiete oder Waldränder.....	101
Abbildung 60	Klassifikation der Lawinenkegel im Testgebiet Evolène VS nach der Elimination von störenden Objekten	102
Abbildung 61	Trennbarkeitsanalyse für die untersuchten GLCM-Texturmasse auf den skalierten Daten zur Simulation von höchstauflösenden Satellitensensoren (Filterboxgrösse 25 Pixel)	103
Abbildung 62	Variation der Filterboxgrösse für das Mass <i>Entropy</i> bei unterschiedlicher räumlicher Auflösung der Eingangsdaten. Schwarz: Mittelwert von AVAL +- eine Standardabweichung, Blau: Mittelwert von UNDI +- eine Standardabweichung.	104

Abbildung 63	Untersuchungsgebiet Davos und die Lage der drei Testgebiete Dorfberg (A), Casanna (B) und Haupter Tälli (C). Die Fluglinien sind mit schwarzen Pfeilen markiert. Reproduziert mit Bewilligung von swisstopo (BA091356)	109
Abbildung 64	Abbildung des Sensorkopfes SH52 und Anordnung der Spektralkanäle, modifiziert nach Leica (2008)	110
Abbildung 65	Schneehöhe und Lawinengefahrenstufe in der Schweiz kurz vor der Befliegung vom 26. April 2008 (www.SLF.ch, Zugriff: 30. April 2008)	111
Abbildung 66	Flugstreifen, aufgenommen im Rahmen der Kampagne AVAL08 (links); PC6 von Leica Geosystems kurz nach der Datenaufnahme (rechts, Fotografie: A. Hüni)	112
Abbildung 67	Illustration des Detailreichtums der Daten. Deutlich sichtbar sind gekreuzte Skier (A), liegende Personen im Schnee (B). Am unteren Bildrand sind die Ausläufer eines leicht überschneiten Lawinenkegels zu erkennen	113
Abbildung 68	Parkplatz der Eishalle Davos in voller räumlicher Auflösung von 20 cm (links) und in der skalierten räumlichen Auflösung von einem Meter (rechts)	114
Abbildung 69	Schematischer Ablauf des Klassifikationsprozesses	115
Abbildung 70	Schattiertes Relief des Untersuchungsgebietes überlagert von den Regionen, in welchen das Vorkommen von Lawinenkegeln ausgeschlossen wurde	117
Abbildung 71	Resultat des Klassifikationsprozesses für das gesamte Untersuchungsgebiet. Detektierte Lawinenkegel der Klasse <i>grosse Kegel</i> sind in rot dargestellt	119
Abbildung 72	Verteilung der Anzahl Lawinnenniedergänge im gesamten Untersuchungsgebiet in Abhängigkeit der Exposition	120
Abbildung 73	Verteilung der Lawinenkegel im gesamten Untersuchungsgebiet abhängig von der durchschnittlichen Hangneigung	120
Abbildung 74	Klassierte Lawinenkegel mit einer Fläche grösser als 2000 m ² im Testgebiet Haupter Tälli. Lawinen sind an Hängen mit unterschiedlicher Exposition aufgetreten	121
Abbildung 75	Klassierte Lawinenkegel mit einer Fläche grösser als 2000 m ² im Testgebiet Casanna	121
Abbildung 76	Klassierte Lawinenkegel mit einer Fläche grösser als 2000 m ² im Testgebiet Dorfberg. Die Lawinen sind hauptsächlich am südost exponierten Hang niedergelangen	122
Abbildung 77	ADS40 Echtfarbendarstellung der Salezer-Lawine überlagert mit dem Klassifikationsergebnis (links). Schrägansicht der Salezer-Lawine aufgenommen einen Tag vor der Befliegung (Fotografie von R. Meister)	122
Abbildung 78	Durch visuelle Bildinterpretation erstellte Referenzdaten für die Abschätzung der Erkennungsgenauigkeit (links) und Kartierungsgenauigkeit (rechts, weiss = Lawinenablagerung) am Beispiel des Testgebietes Dorfberg	124
Abbildung 79	Objekte mit ähnlichen Texturcharakteristika wie Lawinenkegel. A) Skilifte, B) künstliche Anhäufungen von Schnee wie Spuren von Pistenfahrzeugen und C) vom Wind geformte Schneeoberflächen	127
Abbildung 80	Statistische Modellierung zur Abschätzung potentieller Flugtage am Weissfluhjoch für den Monat März 2008, welche die Datenerfassung für eine Detektierung von Lawinenablagerungen ermöglichen	129

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1	Auflistung der bedeutendsten Naturgefahren im Schweizer Alpenraum, modifiziert nach Nöthiger und Elsasser (2004).....	9
Tabelle 2	Ausgewählte historische Naturkatastrophen im Gebiet der heutigen Schweiz. Die Angaben zu Todesopfern und Schäden sind bei weit zurückliegenden Ereignissen nicht gesichert (BABS, 2003; PLANAT, 2006).....	10
Tabelle 3	International anerkannte Klassierung der Lawinentypen (UNESCO, 1981)	15
Tabelle 4	Ergänzende wichtige Typisierungsmerkmale von Lawinen (SLF, 2009a)	15
Tabelle 5	Beschreibung der Lawinengrößenklassen (CAA, 2002; SLF, 2009a)	16
Tabelle 6	Charakterisierung der untersuchten Lawinenablagerungen im Raum Davos.....	37
Tabelle 7	Ergebnisse des Kruskal-Wallis Varianztests für die Unterschiede der Mediane der Spektren von Lawinenablagerungen und der ungestörten Schneedecke (Treichler et al., 2009).....	47
Tabelle 8	Trennbarkeitsanalyse anhand von Absorptionsfeatures in Spektren von Lawinenablagerungen und benachbarten, ungestörten Schneedecken (Treichler et al., 2009)	48
Tabelle 9	Spektralkanäle und Blickwinkel der in der Kampagne AVAL08 eingesetzten ADS40 SH52 (Rohrbach, 2006).....	58
Tabelle 10	Masse der Statistik erster Ordnung abgeleitet aus dem Histogramm innerhalb der quadratischen Filterbox im Ortsraum (Dekker, 2003; PCI, 2005).....	70
Tabelle 11	Aufnahme- und Scanparameter der verwendeten RC30 Luftbilder (Mitteilung der swisstopo).....	81
Tabelle 12	Detailinformationen zu den untersuchten Lawinenkegeln (Wiesinger und Adams, 2008)	82
Tabelle 13	Korrelationskoeffizienten für die Texturmasse der Statistik erster Ordnung für die Klasse UNDI. Die Buchstaben beziehen sich auf die Masse in Tabelle 10 auf Seite 70.	89
Tabelle 14	Parameterwerte, wie sie für die nachfolgenden Untersuchungen verwendet werden.....	94
Tabelle 15	Korrelationskoeffizienten für die Texturmasse nach Haralick für die Klasse UNDI. Die Abkürzungen beziehen sich auf die Bezeichnungen der Texturmasse in Kapitel 6.2.2.3 Seite 73.....	99
Tabelle 16	Trennbarkeitspotential der Texturmasse nach Haralick für die Klassen AVAL und UNDI für Lawinenkegel vom Typ A. Der Wert eins bezeichnet eine vollständige Trennbarkeit, der Wert null eine komplette Überlappung der Stichproben.....	99
Tabelle 17	Technische Daten der in dieser Untersuchung verwendeten Sensorkonfiguration ADS40 SH52 (Leica, 2008).....	110
Tabelle 18	Aufnahmeparameter der Flugstreifen.....	112

Tabelle 19	Wichtige weitere schneebedeckte Flächen und Objekte mit ebenfalls rauen Oberflächen (Spalte 1), verwendete Parameter zur Klassierung (Spalte 2) und Abschätzung des Differenzierbarkeitspotentials gegenüber Lawinenkegeln (Spalte 3).....	118
Tabelle 20	Detektionsrate und producer's accuracy für die alle Lawinenkegel sowie für die Klassen grosse Kegel und kleine Kegel innerhalb der einzelnen Testgebiete und für alle drei Testgebiete zusammen (vgl. Abbildung 63, S. 109).....	125
Tabelle 21	Abschätzung des Zeitaufwandes und der Kosten für die Datenerhebung und deren Auswertung mit einem ADS40 Sensor für ein Gebiet von ca. 100 km ² im Schweizer Alpenraum (mündliche Auskunft S. Bovet, swisstopo).....	134

Glossar

ADS40	Flugzeuggestützter Zeilenscanner der Firma Leica Geosystems
ASD	Feld-Spektroradiometer „FieldSpec®3“ der Firma „Analytical Spectras Devices ASD“
ASTER	„Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer“ Erdbeobachtungssensor auf dem Satelliten TERRA der NASA.
COSMO-SkyMed	Konstellation aus mehreren SAR-Satelliten betrieben von der Italienischen Raumfahrtbehörde ASI, X-Band, räumliche Auflösung ca. 1 bis 100 m, Streifenbreite ca. 10 bis 200 km
DHM	Digitales Höhenmodell, auch DTM für „digital terrain model“ (siehe auch DHM25)
DHM25	Digitales Höhenmodell des Schweizer Bundesamtes für Landestopographie swisstopo. Rastermodell mit 25 m Zellen und einer Höhenauflösung im Dezimeterbereich. Abgeleitet aus den Höhenkurven der Schweizer Landeskarten 1 : 25'000, flächendeckend für die gesamte Schweiz
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Oberpfaffenhofen, Deutschland
DMC	Flugzeuggestützter Zeilenscanner der Firma Intergraph
DOM	Digitales Oberflächemodell, auch DSM für „digital surface model“
GeoEye-1	Kommerzieller Erdbeobachtungssatellit der Firma GeoEye, räumliche Auflösung PAN ca. 0.5 m, MS ca. 4 m, Streifenbreite ca. 15 km
HRSC	Flugzeuggestützter Zeilenscanner des DLR
IKONOS	Kommerzieller Erdbeobachtungssatellit der Firma GeoEye, räumliche Auflösung PAN ca. 1 m, MS ca. 4 m, Streifenbreite ca. 11 km
IRS LISS III	Multispektralsensor mit einer räumlichen Auflösung von ca. 23,5 m und einer Streifenbreite ca. 140 km. Der Sensor befindet sich auf dem Indischen Satelliten IRS-1C
Leica	Leica Geosystems AG, Heerbrugg, Schweiz. Hersteller der ADS40 Luftbildscanner
LIDAR	„Light Detection and Ranging“ Aktive, flugzeuggestützte Fernerkundungstechnologie zur Erfassung von präzisen Gelände- und Oberflächenmodellen
NDAI	Normalized Difference Angular Index. Methode zur Extraktion von richtungsabhängiger Information aus Bilddaten aufgenommen aus unterschiedlichen Blickwinkeln (vgl. Kapitel 5.5.2)
NIR	Nahinfraroter Bereich des elektromagnetischen Spektrums, 700 bis 1300 nm
PAN	Panchromatisches Band optischer Sensoren, reicht meist vom VIS bis in den NIR Bereich des elektromagnetischen Spektrums
QuickBird	Kommerzieller Erdbeobachtungssatellit der Firma DigitalGlobe, räumliche Auflösung PAN ca. 0.6 m, MS ca. 2.5 m, Streifenbreite ca. 16,5 km
RADARSAT-2	Radarsatellit der Kanadischen Raumfahrtbehörde CSA, C-Band, räumliche Auflösung ca. 2 bis 100 m, Streifenbreite ca. 20 bis 500 km
RAMMS	„Rapid Mass Movements“ Modellierungssystem des SLF für Lawinen, Stein- und Murgänge

SAR	„Synthetic Aperture Radar“ Aktive, flugzeug- und satellitengestützte Fernerkundungstechnologie
SLF	WSL Institut für Schnee und Lawinenforschung, Davos, Schweiz
SPOT-5	„Satellite pour l’Observation de la Terre“, europäischer Erdbeobachtungssatellit
SRTM	Shuttle Radar Topography Mission, digitales Höhenmodell abgeleitet aus SAR-Daten. Weltweit verfügbar von ca. 58° S bis 60° N
SWIR	Mittlerer Infrarot Bereich des elektromagnetischen Spektrums, 1300 bis 3000 nm
swisstopo	Schweizerisches Bundesamt für Landestopographie, Wabern, Schweiz
TerraSAR-X	Radarsatellit des DLR, X-Band, räumliche Auflösung ca. 1 bis 16 m, Streifenbreite ca. 4 bis 100 km
VIS	Für das menschliche Auge Sichtbarer Bereich des elektromagnetischen Spektrums, 380 bis 700 nm
WorldView-1	Kommerzieller Erdbeobachtungssatellit der Firma DigitalGlobe, räumliche Auflösung PAN ca. 0.6 m, Streifenbreite ca. 16 km
WSL	Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft, Birmensdorf, Schweiz

Dank

Diese Arbeit entstand in den Jahren 2005 bis 2009 unter der Leitung von Prof. Dr. Klaus I. Itten an der Abteilung „Remote Sensing Laboratories“ RSL des Geographischen Institutes der Universität Zürich. Klaus Itten möchte ich für die Ermöglichung dieser Arbeit, seine Unterstützung und seine wertvollen Anregungen herzlich danken.

Dr. Tobias Kellenberger gebührt als Betreuer und direkter Vorgesetzter während meiner Zeit am RSL besonderen Dank. Sein Interesse an meiner Arbeit, seine Anregungen und sein umfangreiches Fachwissen haben mir geholfen weiterzukommen. Ihm verdanke ich auch die Erfahrung, welche ich durch die Bearbeitung diverser interessanter Projekte am LACOMM sammeln durfte.

Dr. Urs Frei danke ich für das Korrekturlesen der Arbeit und die wertvollen Hinweise und Verbesserungsvorschläge.

Andreas Hüni danke ich für seinen Enthusiasmus und sein ungebrochenes Interesse an Lawinen und Fernerkundung. Andi hat mich während einem Grossteil dieser Arbeit mit Eifer unterstützt. Voller Köpereinsatz war vor allem während der Feldarbeit im hochalpinen Gelände gefordert. Désirée Treichler danke ich für ihre Arbeit im Zusammenhang mit der statistischen Auswertung der Spektroradiometermessungen und für interessante Diskussionen über die spektralen Charakteristika von Lawinekegeln.

Marc Christen, Roland Meister, Perry Bartelt, Jürg Schweizer und Jakob Rhyner vom WSL Institut für Schnee- und Lawinenforschung SLF danke ich für die wertvolle Unterstützung meiner Arbeit und ihr Interesse am Einsatz von Fernerkundungssensoren für die Lawinenforschung.

Den Kollegen von der swisstopo, insbesondere André Streilein und Stéphane Bovet, danke ich für die Unterstützung mit Geodaten, das Interesse an meiner Arbeit und verschiedene Anregungen und Diskussionen.

Fernando Schapira und seinen Kollegen der Firma Leica Geosystems in Heerbrugg danke ich für die Befliegung des Testgebietes Davos im April 2008 sowie für die Prozessierung der Daten.

Meinen Kollegen vom RSL danke ich für viele anregende und interessante Diskussionen in der Mensa, im Kaffeeraum oder in den Gängen über allerlei wichtige und weniger wichtige Themen. Die gute Stimmung am RSL und die vielen interessanten Leute und Projekte machten den Bau 25 am Irchel zu einem sehr angenehmen Arbeitsplatz.

Meinen Eltern danke ich für die Ermöglichung des Geographiestudiums und die Unterstützung während der Studienzeit. Sie haben schon früh mein Interesse für Umweltfragen geweckt.

Den grössten Dank aber gebührt Ladina. Sie hat mich während der gesamten Zeit am RSL unterstützt und hat mich auch in schwierigen Zeiten motiviert. Ladina und Nick haben mir deutlich gemacht, dass Lawinen und Fernerkundung nicht immer die wichtigsten Dinge im Leben sind.

Winterthur, Juni 2009

Kapitel 1

Einleitung

1.1. Problemstellung

Schneelawinen fordern im Schweizer Alpenraum jedes Jahr Todesopfer und verursachen Schäden an Gebäuden und Infrastrukturen in Millionenhöhe. Es treten in unregelmässigen Abständen immer wieder Winter auf, in denen innert wenigen Tagen sehr grosse Schneemengen akkumuliert werden. Dies führt zu einer erhöhten Lawinenaktivität. Grosse, meist spontan ausgelöste Tallawinen zerstören Gebäude und Verkehrswege. Solche ausserordentliche Lawinenwinter traten beispielsweise in den Jahren 1999, 1954 und 1951 auf (SLF, 2000). Zudem bewegen sich aufgrund der intensivierten touristischen Nutzung der Alpen (Nöthiger, 2003) immer mehr Wintersportler abseits der Pisten und dringen in Gebiete vor, welche im Winter bis anhin kaum genutzt wurden. Die von Wintersportlern selber ausgelösten Lawinen fordern in der Schweiz weit mehr Todesopfer als die selten auftretenden und spontan ausgelösten Tallawinen (Tschirky et al., 2000).

Um die Zahl der Todesopfer sowie die Schäden zu reduzieren, wird in der Schweiz und im gesamten Alpenraum intensiv geforscht. Dank Massnahmen wie der Aufforstung von Bannwäldern oder der Errichtung von Lawinenverbauungen ist die Zahl der Todesopfer auf Verkehrswegen und in Gebäuden deutlich zurückgegangen. Dank verbesserter Information, Ausbildung und Ausrüstung der Wintersportler hat die Zahl der Todesopfer trotz der gestiegenen Zahl der Verschütteten abgenommen (Harvey und Zweifel, 2008).

Die zahlreichen komplexen Mechanismen der Entstehung und Wirkung von Lawinen sind noch nicht ausreichend bekannt. Lawinenrelevante Parameter sind räumlich und zeitlich stark variabel und Messungen aus einem Gebiet können nicht direkt auf weitere Gebiete extrapoliert werden (Schweizer et al., 2008). Mit einem kostenintensiven Netz, bestehend aus automatischen Stationen und Beobachtern, werden im Schweizer Alpenraum lawinenrelevante Informationen erhoben. Schadenlawinen werden in der Schweiz systematisch in der Schadenlawinen-Datenbank des Institutes für Schnee und Lawinenforschung SLF erfasst (Latarnser et al., 1995). Zusätzlich melden bis zu 180 Beobachter, verteilt über den gesamten Schweizer Alpenraum, täglich die Lawinenaktivität (SLF, 2008a). Diese Informationen fliessen in die Lawinenprognosen des SLF ein. Die überwiegende Mehrheit der Lawinen geht aber in abgelegenen Gebieten nieder und verursacht keine Schäden. Diese Ereignisse werden deshalb von den Beobachtern nur sporadisch erfasst. Es sind aber insbesondere kleine bis mittlere Lawinen im hochalpinen Gebiet, welche von Wintersportlern ausgelöst werden und Menschen verschütten, verletzen oder sogar töten (Harvey und Zweifel, 2008).

Weil lawinenrelevante Daten in zahlreichen Regionen der Alpen und insbesondere in alpinen Regionen in Schwellen- und Entwicklungsländern nicht im selben Umfang und in derselben Qualität vorliegen wie in der Schweiz, müssen in diesen Regionen noch grosse Anstrengungen zur Erhebung solcher Daten unternommen werden, damit die Wohnbevölkerung und Wintersportler effizient vor der zerstörerischen und tödlichen Kraft der Lawinen geschützt werden können.

1.2. Zielsetzung der Arbeit

Fernerkundungssensoren können auch in schwer zugänglichen Regionen systematisch und flächendeckend Daten erheben. Diese Eigenschaften machen sie zu einem potentiellen Werkzeug für die Ergänzung der bestehenden Datenerhebungsmethoden und zur Schliessung von Datenlücken in schwer zugänglichen oder abgelegenen Gebieten. Mit dieser Arbeit wird erforscht, ob Lawinenablagerungen im hochalpinen Gelände des Schweizer Alpenraums mit optischen Fernerkundungsdaten rasch und mit ausreichender Präzision detektiert und kartiert werden können. Diesbezüglich besteht bis heute eine bedeutende Forschungslücke.

Das Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung einer Methode zur systematischen und synoptischen Erkennung und Kartierung von Lawinenablagerungen unterschiedlicher Grösse mit optischen, räumlich hochauflösenden Fernerkundungsdaten im Schweizer Alpenraum.

Anhand einer umfassenden Analyse der optischen Charakteristika von Lawinenkegeln und deren Erscheinungsbild in räumlich hochauflösenden Fernerkundungsdaten werden geeignete Indikatoren zur Klassierung von Lawinenablagerungen identifiziert. Die Textureigenschaften, die direktionalen Eigenschaften sowie die spektralen Eigenschaften von Lawinenablagerungen und der angrenzenden, ungestörten Schneedecke werden untersucht.

Die aussagekräftigsten Indikatoren werden verwendet, um eine Prozessierungskette zu entwickeln, mit der Lawinenablagerungen automatisch erkannt und kartiert werden können. Die Methodologie wird auf Daten des flugzeuggestützten Scanners ADS40 im Testgebiet Davos angewendet und auf ihre Stärken und Schwächen geprüft.

1.3. Motivation

Eine systematische und synoptische Kartierung von Lawinnenniedergängen in schwer zugänglichen, heute nicht überwachten Regionen kann einen substantiellen Beitrag in den folgenden Bereichen leisten:

A. Evaluation von Lawinengefahrenprognosen

Das SLF publiziert während der schneereichen Periode täglich eine nationale Lawinenprognose für den gesamten Schweizer Alpenraum sowie detaillierte regionale Prognosen. Die Lawinengefahr wird anhand der Europäischen Lawinengefahrenskala prognostiziert (vgl. Abbildung 1) und findet bei Wintersportlern grosse Beachtung (Rhyner et al., 2002; Russi et al., 2003). Mit flächendeckenden Informationen über die räumliche Verteilung der Lawinenaktivität können diese Prognosen überprüft und weiterentwickelt werden (Schweizer et al., 2003). Eine systematische Kartierung der Lawinnenniedergänge, auch in schlecht zugänglichen Regionen, könnte dazu einen substanziellen Beitrag leisten, weil die Lawinenbeobachter des SLF zahlreiche Regionen nicht überwachen können. Insbesondere Lawinen kleineren bis mittleren Ausmasses werden heute nicht oder nicht genügend systematisch erfasst.

B. Verbesserung von Gefahrenkarten

Gefahrenkartierungen basieren zu einem wesentlichen Teil auf der Auswertung vergangener Ereignisse. In der Schweiz sind die Gemeinden verpflichtet, Gefahrenkarten für Hochwasser, Lawinen, Rutschungen sowie Sturzprozesse zu erstellen und diese bei raumwirksamen Tätigkeiten zu berücksichtigen (Bundesgesetz über den Wasserbau WBG, 1991, Bundesgesetz zum Wald WaG, 1991, Raumplanungsgesetz RPG, 1979). Die Kartierung von gefährdeten Gebieten kann substantielle ökonomische Auswirkungen für die Besitzer exponierter Grundstücke zur Folge haben. Im Hinblick auf ändernde meteorologische Voraussetzungen im Alpenraum (OcCC/ProClim, 2007) und den zunehmenden Nutzungsdruck in hochalpinen Regionen (Nöthiger und Elsasser, 2004) ist eine kontinuierliche Erhebung der Lawinenaktivität wichtig. Die systematische Kartierung von Lawinen mit Fernerkundungsdaten kann genutzt werden, um Lücken in den Datenbanken zu schliessen und die Aussagekraft der Gefahrenkarten zu verbessern.

C. Ergänzung der Lawinenkataster

Die bestehenden Lawinenkataster des SLF (Latenser et al., 1995; SLF, 2008a) sowie kantonale Kataster können durch die automatisierte Kartierung von Lawinnenniedergängen, besonders in abgelegenen Gebieten substantiell ergänzt werden.

D. Entscheidungsfindung bei der Freigabe von Pisten und Strassen

Rasch verfügbare Informationen über die aktuelle Lawinenaktivität sind essentiell für die Einschätzung der aktuellen Gefährdung von Gebieten (McClung und Schaerer, 2006). Mit Fernerkundungssensoren erhobene Informationen zur räumlichen Verteilung der Lawinnenniedergänge auch in unzugänglichen Gebieten können zur Verbesserung der Entscheidungsfindung beitragen. Weil Skigebiete und Strassen bei den Gefahrenstufen gross

und sehr gross (vgl. Abbildung 1) meist geschlossen sind, kommen den kleinen und mittleren Lawinen, welche hauptsächlich bei den Gefahrenstufen erheblich und mässig auftreten, besondere Bedeutung zu.

E. Evaluation und Kalibrierung von Lawinenmodellen

Lawinensimulationen benötigen zur Überprüfung und Kalibrierung der Modelle möglichst vollständige Daten über reale Lawenniedergänge (Bartelt et al., 1999; Gruber und Bartelt, 2007; Sampl und Zwinger, 2004). Dazu dienen heute in der Schweiz meist die Daten der Grosslawinen aus dem Winter 1999 (Christen et al., 2008). Um diese Modelle auch für kleinere und mittlere Lawinen einsetzbar zu machen, werden Informationen über die Lage und die Ausdehnung solcher Lawinen benötigt. Da diese Daten heute in den meisten Gebieten nicht vorhanden sind, kann die automatisierte Kartierung solcher Lawinenereignisse einen wichtigen Beitrag zur Datenerhebung leisten.

F. Erforschung der Charakteristika mittlerer und kleiner Lawinen

Der Fokus der Lawinenforschung wendet sich verstärkt kleineren und mittleren Lawinenereignissen zu. Einerseits fordern solche Lawinen, meist von den betroffenen Wintersportlern selbst ausgelöst, die Mehrheit der Todesopfer (Harvey und Zweifel, 2008). Andererseits sind solche Lawinen wichtig für die Sicherheit von Skipisten und Verkehrswegen.

Diskussionen mit Mitarbeitern des SLF haben gezeigt, dass der Nutzen von Informationen über Lawenniedergänge in Regionen, welche durch das Beobachtungsnetz nicht abgedeckt sind, für zahlreiche weitere Forschungsgebiete wie Schneehydrologie oder Lawindynamik von grosser Bedeutung ist.






	Gefahrenstufe	Schneedeckenstabilität	Lawinen-Auslösewahrscheinlichkeit	Auswirkungen für Verkehrswege und Siedlungen / Empfehlungen	Auswirkungen für Personen ausserhalb gesicherter Zonen / Empfehlungen
1	gering 	Die Schneedecke ist allgemein gut verfestigt und stabil.	Auslösung ist allgemein nur bei grosser Zusatzbelastung ** an sehr wenigen, extremen Steilhängen möglich. Spontan sind nur Rutse und kleine Lawinen möglich.	Keine Gefährdung.	Allgemein sichere Verhältnisse.
2	mässig 	Die Schneedecke ist an einigen Steilhängen nur mässig verfestigt, ansonsten allgemein gut verfestigt.	Auslösung ist insbesondere bei grosser Zusatzbelastung ** vor allem an den angegebenen Steilhängen möglich. Grössere spontane Lawinen sind nicht zu erwarten.	Kaum Gefährdung durch spontane Lawinen.	Mehrheitlich günstige Verhältnisse. Vorsichtige Routenwahl, vor allem an Steilhängen der angegebenen Exposition und Höhenlage.
3	erheblich 	Die Schneedecke ist an vielen Steilhängen nur mässig bis schwach verfestigt.	Auslösung ist bereits bei geringer Zusatzbelastung ** vor allem an den angegebenen Steilhängen möglich. Fallweise sind spontan einige mittlere, vereinzelt aber auch grosse Lawinen möglich.	Exponierte Teile vereinzelt gefährdet. Dort sind teilweise Sicherheitsmassnahmen zu empfehlen.	Teilweise ungünstige Verhältnisse. Erfahrung in der Lawinenbeurteilung erforderlich. Steilhänge der angegebenen Exposition und Höhenlage möglichst meiden.
4	gross 	Die Schneedecke ist an den meisten Steilhängen schwach verfestigt.	Auslösung ist bereits bei geringer Zusatzbelastung ** an zahlreichen Steilhängen wahrscheinlich. Fallweise sind spontan viele mittlere, mehrfach auch grosse Lawinen zu erwarten.	Exponierte Teile mehrheitlich gefährdet. Dort sind Sicherheitsmassnahmen zu empfehlen.	Ungünstige Verhältnisse. Viel Erfahrung in der Lawinenbeurteilung erforderlich. Beschränkung auf mässig steiles Gelände / Lawinenauslaufbereiche beachten.
5	sehr gross 	Die Schneedecke ist allgemein schwach verfestigt und weitgehend instabil.	Spontan sind viele grosse Lawinen, auch in mässig steilem Gelände zu erwarten.	Akute Gefährdung. Umfangreiche Sicherheitsmassnahmen.	Sehr ungünstige Verhältnisse. Verzicht empfohlen.

Abbildung 1 Europäische Lawinengefahrenskala mit Empfehlungen
(<http://www.slf.ch/lawineninfo/zusatzinfos/lawinenskala-europa>, Zugriff: 25. 11. 2008)

1.4. Aufbau der Arbeit

In Kapitel 2 wird ein allgemeiner Überblick über Naturkatastrophen auf globaler Ebene gegeben. Anschliessend werden alpenraumspezifische Naturkatastrophen

erläutert sowie die verschiedenen Lawinentypen und ihre Entstehung kurz beschrieben. Die wichtigen Begriffe im Zusammenhang mit Lawinen werden definiert und es wird ein Überblick über Personen- und Materialschäden in der Schweiz gegeben.

In Kapitel 3 wird im Sinne eines „*state of the art*“, aufgezeigt, welche lawinenrelevanten Parameter mittels Fernerkundungsdaten erhoben werden.

In Kapitel 4 werden die spektralen Eigenschaften von Lawinenablagerungen und der angrenzenden, ungestörten Schneedecke anhand von Spektroradiometermessungen von neun Testlawinen aus dem Raum Davos untersucht.

In Kapitel 5 werden die direktionalen Eigenschaften von Lawinenkegeln und der ungestörten Schneedecke untersucht. Dazu werden multiangulare Daten des flugzeuggestützten Scanners ADS40 aus dem Raum Davos sowie Fotografien, aufgenommen während der Feldarbeit, verwendet.

In Kapitel 6 werden die Textureigenschaften von Lawinenkegeln und der ungestörten Schneedecke analysiert. Dazu werden RC30 Luftbilder aus dem Winter 1999 ausgewertet. In der Literatur beschriebene Texturmasse werden auf ihre Eignung für die Unterscheidung zwischen Lawinenkegel und der ungestörten Schneedecke untersucht. Die Parameter der Texturmasse werden dabei systematisch variiert um die optimalen Einstellungen zu erfassen.

In Kapitel 7 werden die geeigneten Indikatoren aus den Kapiteln 4 bis 6 verwendet, um eine Prozessierungskette für die automatisierte Erkennung und Kartierung von Lawinenablagerungen zu entwickeln. Diese wird auf Daten des räumlich hochauflösenden, optischen Luftbildscanners ADS40 aus dem Raum Davos angewendet. Die Resultate werden auf ihre Genauigkeit geprüft und diskutiert.

In Kapitel 8 werden die Methoden und Ergebnisse der vorangegangenen Kapitel diskutiert und Schlussfolgerungen gezogen. Ein Ausblick auf zukünftige Möglichkeiten und Forschungsfragen schliesst die Arbeit ab.

Kapitel 2

Lawinen - Naturkatastrophen im alpinen Gelände

2.1. Naturkatastrophen – ein weltweiter Überblick

Es existieren verschiedene Definitionen des Begriffes Naturkatastrophe, wovon aber keine allgemein anerkannt ist. In der Englischen Sprache werden hauptsächlich die Begriffe *natural hazard* sowie *natural disaster* verwendet. Die Enzyklopädie Brockhaus definiert den Begriff Naturkatastrophe folgendermassen: „Sammelbezeichnung für alle extremen Naturereignisse, die nicht nur zu grossen Schäden in der Natur sondern vor allem an vom Menschen geschaffenen Bauwerken und Infrastrukturen, sowie zu zahlreichen Todesopfern, Verletzten und Obdachlosen führen“. Das *Centre for Research on the Epidemiology of Disasters* CRED und die *International Strategy for Disaster Reduction* UN/ISDR definiert eine Katastrophe als eine Situation oder ein Ereignis, welches die Kapazitäten der lokalen Bevölkerung und Behörden übersteigt und nationale oder internationale Hilfe nötig macht (Guha-Sapir et al., 2004). Um in die von CRED betriebenen *International Disaster Database* EM-Dat aufgenommen zu werden, muss ein Ereignis eines der folgenden Kriterien erfüllen:

- 10 oder mehr Personen getötet (inklusive vermisste Personen und vermutete Todesopfer)
- 100 oder mehr Personen betroffen (bedürfen sofortiger Hilfe)
- Ausrufen eines Notstandes
- Ruf nach internationaler Hilfe

Wisner et al. (2004) kritisieren den Begriff Naturkatastrophe weil extreme Naturgewalten erst durch die Verletzlichkeit der Menschen und ihrer Infrastrukturen zur Katastrophe werden. Sie beschreiben eine Katastrophe durch die Gleichung (1):

$$R = H \times V \quad (1)$$

wobei: R = Ausmass der Katastrophe, „risk“

H = Naturgewalt, „hazard“ (Zerstörungspotential und Eintretenswahrscheinlichkeit)

V = Verletzlichkeit, „vulnerability“ (exponierte Werte)

Im alltäglichen Sprachgebrauch werden aber auch Ereignisse mit weit geringerem Ausmass als Naturkatastrophe bezeichnet. Die weltweit auftretenden Naturkatastrophen lassen sich nach (ISDR, 2005) in drei Gruppen aufteilen:

- Hydro-meteorologische Katastrophen wie Überschwemmungen, Stürme, Erdbeben, Murgänge und Lawinen
- Geophysikalische Katastrophen wie Erdbeben, Tsunamis und Vulkanausbrüche
- Biologische Katastrophen wie Pandemien oder verheerender Schädlingsbefall

In zahlreichen Statistiken wird zusätzlich die Gruppe klimatologische Katastrophen aufgeführt, welche Ereignisse wie Hitze- und Kältewellen, Waldbrände und Dürren beinhalten (vgl. Abbildung 2). Für die Gesamtheit dieser Ereignisse wird nachfolgend zur Vereinfachung der Sammelbegriff Naturkatastrophen verwendet. Hungersnöte, welche weder eindeutig Naturkatastrophen noch technische Katastrophen sind, finden in keiner dieser Gruppen Platz.

Naturkatastrophen bedrohen die Menschen und ihre Infrastrukturen seit Urzeiten in allen Regionen der Erde. Weltweit verursachen vor allem hydro-meteorologische Ereignisse den Grossteil der Schäden an Gebäuden und Infrastrukturen (Abbildung 2). Die Schadenssumme nimmt aufgrund der wachsenden Bevölkerung sowie der Ausbreitung von Nutzflächen, Siedlungsgebieten und Infrastrukturen tendenziell zu (Abbildung 3). Dadurch wird die Verletzlichkeit der Bevölkerung erhöht. In den Jahren 1950 bis 2007 kamen schätzungsweise 1,8 Millionen Menschen durch Naturkatastrophen ums Leben, wobei die Flutkatastrophe 1970 in Bangladesh mit ca. 300'000 Todesopfern, das Erdbeben 1976 in China mit ca. 255'000 Todesopfern und der Tsunami 2004 im Indischen Ozean mit rund 220'000 Todesopfern die verlustreichsten Ereignisse waren (SwissRe, 2007). Allerdings sind Zahlen zu Todesopfern und Schäden mit Vorsicht zu interpretieren, da verschiedene Unsicherheitsfaktoren eine präzise Erhebung der Daten verunmöglichen (Guha-Sapir und Below, 2006). Die verbesserte Datenlage über Naturkatastrophen und ihre Auswirkungen in den letzten Jahren sind, neben der gesteigerten Verletzlichkeit, der Hauptgrund für die statistische Zunahme der Ereignisse.

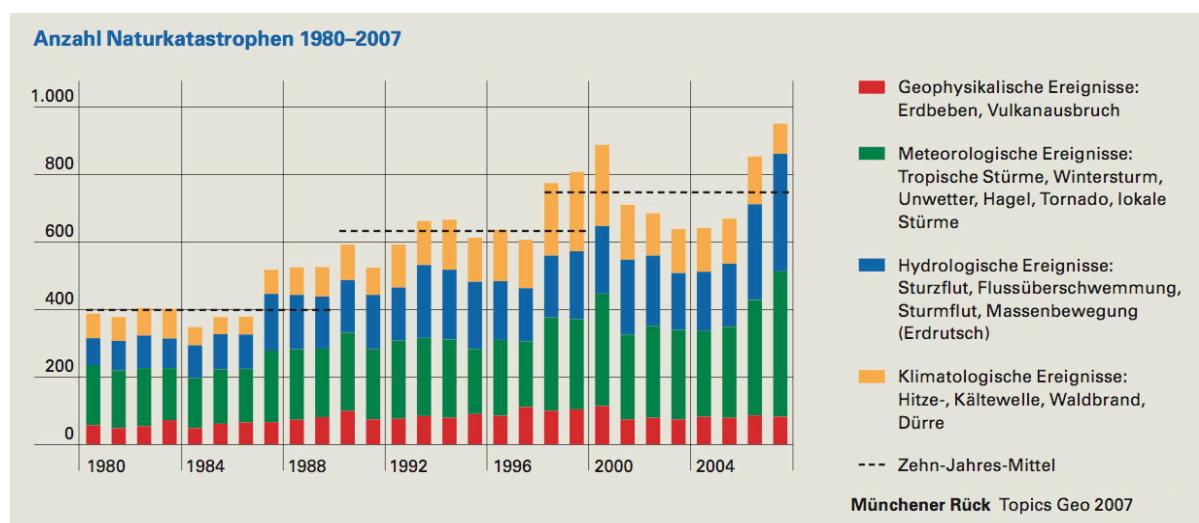


Abbildung 2 Entwicklung der Anzahl Naturkatastrophen weltweit, aufgegliedert nach Ereignistypen (MunichRe, 2008)

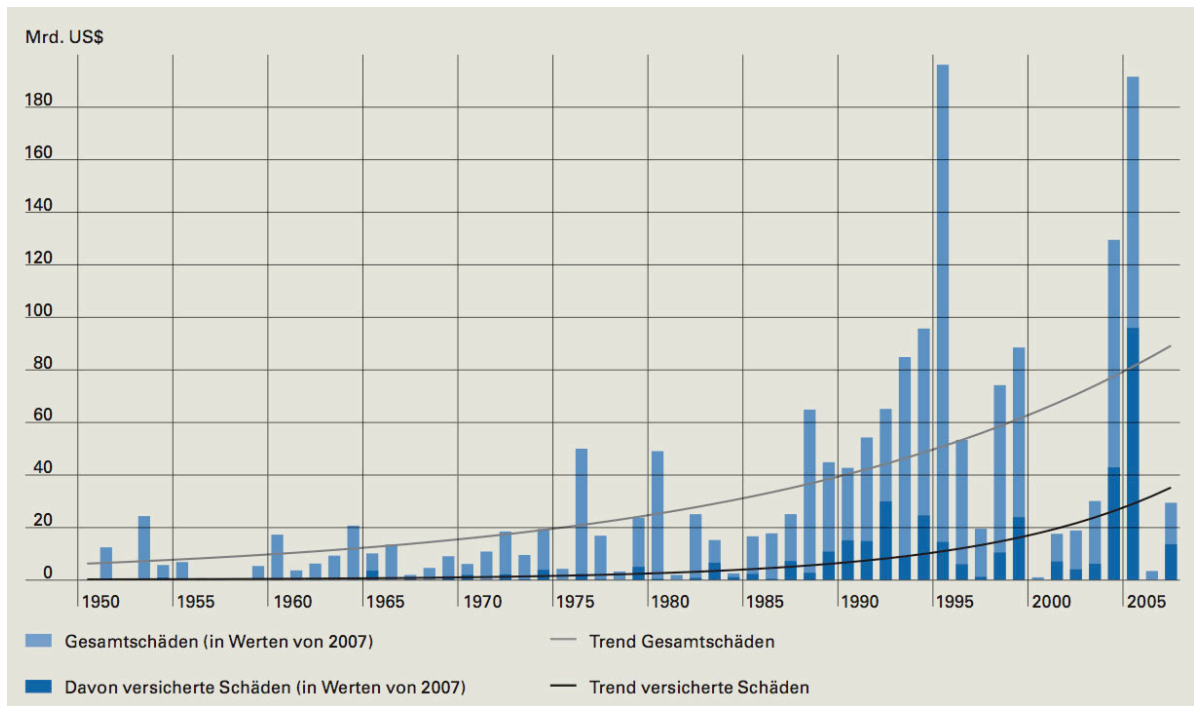


Abbildung 3 Entwicklung der weltweiten Schäden verursacht durch Naturkatastrophen (MunichRe, 2008)

Aufgrund der zunehmenden Exposition der Bevölkerung und ihrer Infrastrukturen gegenüber Naturgefahren und einer sich abzeichnenden Häufung von Extremereignissen (OcCC/ProClim, 2007) werden auch die Herausforderungen für die Bewältigung, Regeneration, Linderung und Prävention der Folgen von Naturkatastrophen grösser. Rasch verfügbare und verlässliche Informationen über die Lokalisierung betroffener Regionen und das Ausmass der Schäden sind zur Bewältigung dieser Herausforderungen wichtig (Buehler und Kellenberger, 2007).

2.2. Naturkatastrophen im Schweizer Alpenraum

Auch in der Schweiz bedrohen Naturkatastrophen Bevölkerung, Gebäude und Infrastrukturen. Aufgrund der extremen Höhenunterschiede im Alpenraum und der tektonisch vergleichsweise ruhigen Situation der Schweiz treten aber gravitative, hydrologische und meteorologische Naturkatastrophen in den Vordergrund (Tabelle 1, Abbildung 2).

Tabelle 1 Auflistung der bedeutendsten Naturgefahren im Schweizer Alpenraum, modifiziert nach Nöthiger und Elsasser (2004)

	gravitativ (gebirgstypisch)	nicht gravitativ (nicht gebirgstypisch)
relativ häufig	Lawinen Murgänge Erdrutsche Felsstürze Steinschlag dynamische Hochwasser	Stürme Gewitter Hagel statische Hochwasser Waldbrand
relativ selten	Seeausbrüche Bergstürze	Trockenheit verheerende Erdbeben Meteoriteneinschläge verheerender Schädlingsbefall

Nach der ausführlichen Risikobeurteilung des Bundesamtes für Bevölkerungsschutz BABS sind die in Tabelle 1 aufgelisteten Naturkatastrophen für rund zwei Drittel der Bedrohung durch katastrophale Ereignisse in der Schweiz verantwortlich. Ereignisse infolge Gewalt unterhalb der Kriegsschwelle (z. B. Terrorismus) und bewaffnete Konflikte sind in dieser Untersuchung nicht berücksichtigt worden (BABS, 2003). Abbildung 4 illustriert den Anteil der einzelnen Ereignistypen an der erwarteten Bedrohung durch Naturkatastrophen in der Schweiz.

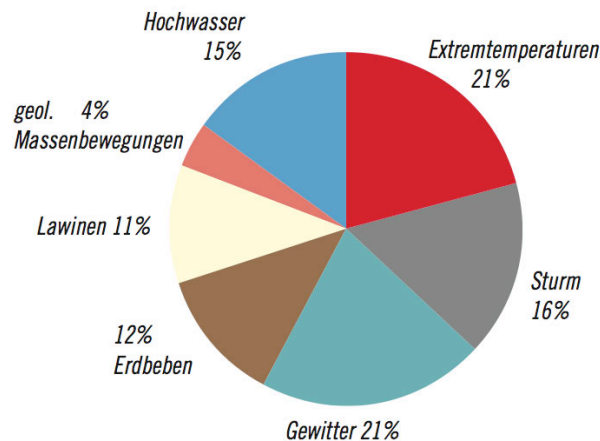


Abbildung 4 Naturkatastrophen in der Schweiz nach Ereignistyp. Die geschätzte durchschnittliche Schadenssumme in der Schweiz beträgt 1,8 Milliarden CHF pro Jahr (BABS, 2003; Jordi, 2007)

Die Ereigniskategorien „Gewitter“, „Sturm“ und „Hochwasser“, welche unter dem Sammelbegriff „Unwetter“ zusammengefasst werden, machen mit 52% den grössten Anteil an der Bedrohung durch Naturkatastrophen in der Schweiz aus. Diese Ereignisse sind häufig, das Schadenspotential liegt aber deutlich tiefer als bei seltenen, grossen Erdbeben. Gravitative Prozesse wie geologische Massenbewegungen und Lawinen treten zwar häufig auf, betreffen aber meist nur einzelne Regionen. Extremtemperaturen dagegen betreffen ganze Landstriche, was den hohen Anteil an der Bedrohung erklärt.

Im Gebiet der heutigen Schweiz ist es in der Vergangenheit zu verschiedenen fatalen Naturkatastrophen gekommen (Tabelle 2). Diese Ereignisse führen uns vor

Augen, dass seltene zerstörerische Ereignisse auch in der Schweiz jederzeit auftreten können.

Tabelle 2 Ausgewählte historische Naturkatastrophen im Gebiet der heutigen Schweiz. Die Angaben zu Todesopfern und Schäden sind bei weit zurückliegenden Ereignissen nicht gesichert (BABS, 2003; PLANAT, 2006)

Datum	Katastrophe	Todesopfer	Schäden
1132, 1135, 1150, 1152	Grosse Trockenheit und Wassermangel	?	?
18. Okt. 1356	Erdbeben von Basel BS (IX bis X auf der Richterskala)	ca. 1500	Basel wurde nahezu vollständig zerstört, im Umkreis von 30 km wurden fast alle Kirchen, Burgen und Festungen zerstört
30. Mai 1515	Flutwelle von Biasca TI (Seeausbruch)	ca. 500	Zahlreiche Dörfer im Tal von Biasca wurden zerstört
Februar 1720	Lawine in Obergesteln VS	ca. 50 - 90	ca. 120 Gebäude zerstört und ca. 400 Stück Vieh getötet
Winter 1749	Lawinen in TI und GR	94	?
Juli 1778	Flutkatastrophe in Küsnacht ZH	63	15 Wohnhäuser, 8 Brücken und zahlreiche weitere Gebäude wurden zerstört
2. Sept. 1806	Bergsturz von Goldau SZ	953	Die Dörfer Goldau, Röthen und Busingen wurden ausradiert, eine Flutwelle zerstörte das Dorf Lauerz
Dez. 1808	Lawinen in den Alpen (BE, GR)	68	Zahlreiche zerstörte Wohnhäuser und Ställe
25. Jul. 1855	Erdbeben im Vispertal VS (IX auf der Richterskala)	250	Zahlreiche Gebäude im Umkreis bis zu 100 km wurden zerstört
11. Sept. 1881	Bergsturz von Elm GL	115	83 Gebäude und 4 Brücken werden zerstört
März 1888	Lawinen in den Alpen (BE, GR, SG, TI, UR, VS)	49	850 Gebäude zerstört, 700 Stück Vieh getötet und 1325 ha Wald zerstört
25. Jan. 1946	Erdbeben in Sierre VS (max. VIII auf der Richterskala)	4	3500 Gebäude beschädigt, Panik in der Bevölkerung
Januar 1951	Lawinen im Alpenraum	98	187 Häuser und 1302 weitere Gebäude zerstört
August 1987	Unwetter im Alpenraum (UR, VS, TI)	8	ca. 800 Millionen CHF
Jan./Feb. 1999	Lawinen im Alpenraum	17	Über 600 Millionen CHF Schäden an Gebäuden und Infrastrukturen
26. Dez. 1999	Orkan „Lothar“	14	1,7 Milliarden CHF Schäden an Gebäuden, Wald und Fahrzeugen
14. Okt. 2000	Unwetter im Wallis	16	Erdrutsch in Gondo VS, Schäden in weiteren Dörfern
August 2005	Unwetter im Alpenraum	8	ca. 3 Milliarden CHF Schäden an Gebäuden und Infrastrukturen

2.3. Lawinen im Schweizer Alpenraum

Die Enzyklopädie Brockhaus definiert den Begriff Lawine als „am Hang rasch abgleitendes oder stürzendes Material, im Allgemeinen Schnee, seltener Eis, Schutt oder Steine mit einem Versatzbetrag von über 50 Metern.“ Im anglophonen Sprachraum wird der Begriff *avalanche* verwendet. Schneelawinen werden analog zum deutschen Sprachgebrauch als *snow avalanches* bezeichnet. In dieser Arbeit wird der Begriff Lawinen ausschliesslich für Lawinen aus Schnee verwendet.

Abbildung 4 und Tabelle 2 zeigen, dass Lawinen in der Schweiz eine bedeutende Bedrohung für Bevölkerung, Gebäude und Infrastrukturen waren und immer noch sind. In zahlreichen Gebieten in den Alpen stellen sie gar die grösste Bedrohung dar (Ammann, 2003). Weltweit gesehen spielen Lawinen als Bedrohung für die Menschheit eine untergeordnete Rolle. In alpinen Regionen wie der Schweiz fordern sie aber, aufgrund der Auftretenshäufigkeit, über Jahrzehnte gesehen mehr Todesopfer als alle anderen Typen von Naturkatastrophen und verursachen grosse Schäden an Gebäuden und Infrastrukturen. Nicht zu vernachlässigen ist auch die Bedeutung von Lawinen für den Wintertourismus in der Schweiz. In Folge des Lawinenwinters 1999 nahm die Anzahl der Übernachtungen in den betroffenen Wintersportorten kurzfristig deutlich ab (Nöthiger, 2003).

Die Schweiz verfügt mit dem SLF in Davos über eine weltweit führende Forschungseinrichtung im Bereich Schnee und Lawinen. Aufgrund der langjährigen Arbeit der Wissenschaftler dieses Institutes sind in der Schweiz und besonders im Raum Davos zahlreiche Datensätze über Lawinnenniedergänge verfügbar.

2.3.1. Lawinentypen und ihre Entstehung

Grundvoraussetzungen für die Entstehung einer Lawine sind ein steiler Hang mit einer Neigung von 25° bis 45° sowie eine darauf abgelagerte Schneedecke. Die weiteren Voraussetzungen, welche die Entstehung einer Lawine beeinflussen, bestimmen den Typ der Lawine. Die Ausführungen in diesem Kapitel basieren auf den Grundlagewerken von McClung und Munter (McClung und Schaerer, 2006; Munter, 2003) sowie auf dem Glossar Schnee und Lawinen des SLF (SLF, 2009b).

Nachfolgend werden die wichtigsten Lawinentypen und ihre Entstehung kurz erläutert. Für weiterführende Informationen wird auf die Werke von McClung und Schaerer sowie von Munter verwiesen.

A. Lockerschneelawine (Abbildung 5 A)

Meist spontan ausgelöste kleinere Lawinen, welche einen punktförmigen Ursprung haben. Dieser Typ von Lawinen tritt häufig nach Neuschneefällen auf und ist für Wintersportler weit weniger gefährlich als Schneebrettlawinen. Die Hauptgefahr besteht darin, von der Lockerschneelawine mitgerissen zu werden und sich im felsigen Gelände zu verletzen.

B. Schneebrettlawine (Abbildung 5 B)

Liegt eine Schicht von gebundenem Schnee (z.B. Tribschnee) über einer Schicht mit geringer Resistenz für Scherspannung (z.B. Schwimmschnee oder überschneiter Oberflächenreif) können Schneebrettlawinen entstehen. Bereits ein einzelner Skifahrer kann Schneebretter von grosser Mächtigkeit auslösen. Schon kleine Schneebrettlawinen reichen aus um die verschütteten Personen zu töten. Rund 90% aller Lawinen mit verschütteten Personen sind Schneebrettlawinen und werden von den Wintersportlern primär selber ausgelöst.

C. Staublawine (Abbildung 5 C)

Der Begriff bezieht sich auf die Art der Bewegung und bezeichnet Lawinen aus feinkörnigem, trockenem Schnee. Solche Lawinen werden meistens als Schneebrettlawine ausgelöst, die dann beim Niedergang ein Schnee-Luft Gemisch bildet und eine Schneestaubwolke verursacht. Diese Lawinen erreichen Spitzengeschwindigkeiten von bis zu 300 km/h und erzeugen eine starke Luftdruckwelle, welche auch ausserhalb der Ablagerungszone Schäden verursachen kann. Dieser Typ Lawine ereignet sich häufig im Hochwinter bei kalten Temperaturen.

D. Nassschneelawine (Abbildung 5 D)

Befindet sich flüssiges Wasser in der Schneedecke spricht man von Nassschneelawinen. Diese Lawinen fliessen deutlich langsamer als Staublawinen und weisen meist eine deutlich kürzere Auslaufstrecke auf. Durch die hohe Dichte des Schnees werden grosse Drücke auf im Wege stehende Objekte erzeugt. Dieser Lawinentyp ereignet sich häufig im Frühjahr bei relativ hohen Temperaturen oder nach Regenfällen.

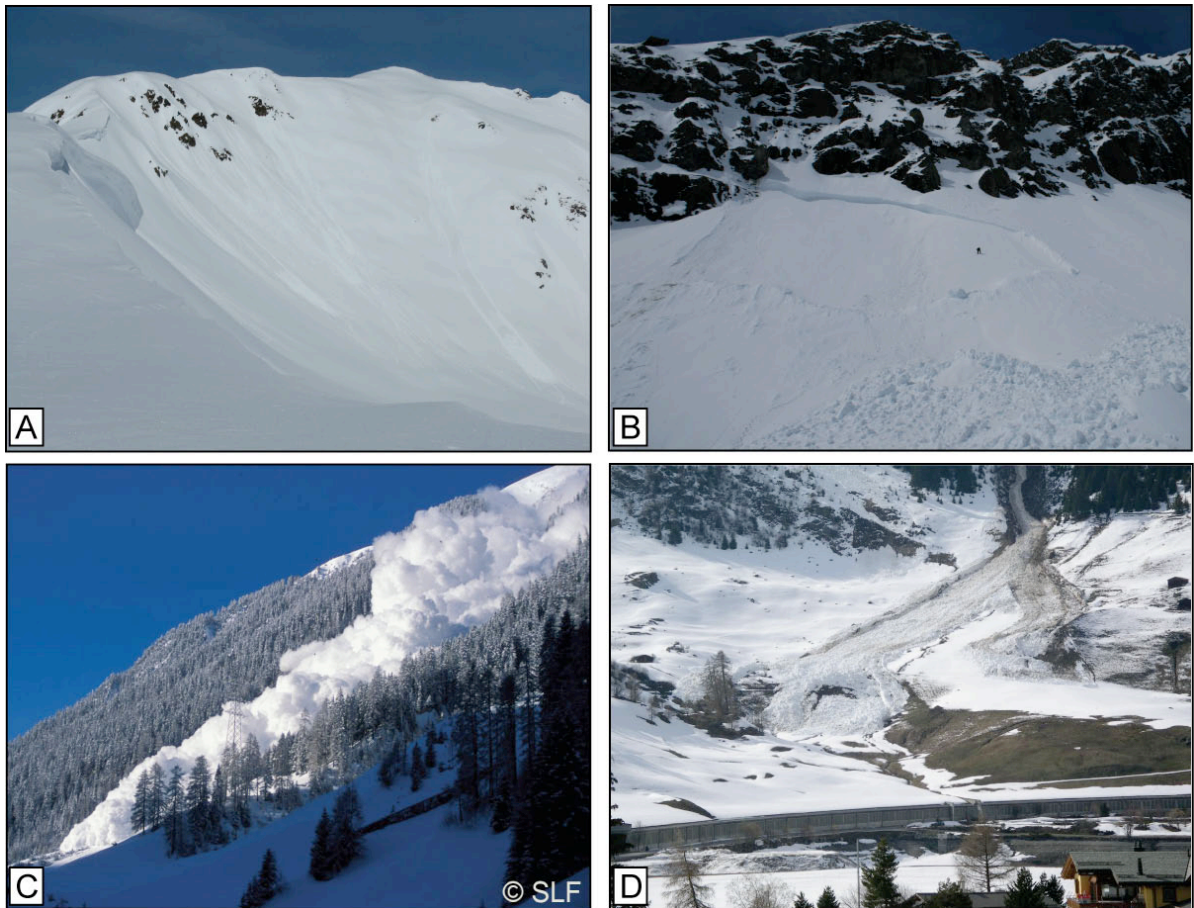


Abbildung 5 Illustration der wichtigsten Lawinentypen an Beispielen aus der Region Davos. A) Lockerschneelawine, B) Schneebrettlawine, C) Staublawine, D) Nassschneelawine. Fotografien: A) Y. Bühler, B) A. Hüni, C) SLF, D) R. Meister

In natura treten oft Mischformen der beschriebenen Lawinentypen auf. Es kann beispielsweise vorkommen, dass ein Ereignis in hohen Lagen mit einem Schneebrett als Staublawine startet und durch das Mitreissen von nassen Schneeschichten in tieferen Lagen zur Nassschneelawine wird (Sovilla et al., 2007). Eine eindeutige Katalogisierung vieler Lawinen ist deshalb oft nicht möglich.

Lawinen setzen sich aus der Anrisszone (z.B. Schneebrett), der Translationszone (Sturzbahn) und der Ablagerungszonen zusammen (Abbildung 6). Die Abgrenzung dieser Gebiete ist oft schwierig und zum Teil gehen die einzelnen Zonen fließend ineinander über. Die Translationszone ist bei kleineren Lawinen oft nur schwach ausgeprägt und die Ablagerung schliesst direkt an die Anrisszone an.

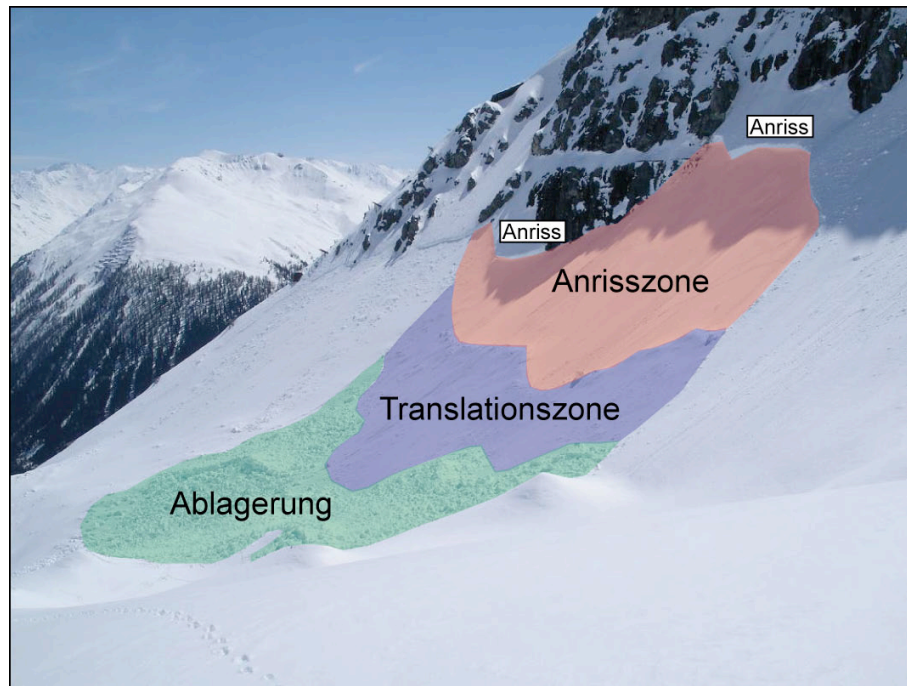


Abbildung 6 Unterschiedliche Zonen einer Lawine, illustriert am Beispiel einer Schneebrettlawine mittlerer Grösse in der Region Parsenn, Davos

Ein international anerkanntes System zur Klassifizierung von Lawinen wurde von der Internationalen Kommission für Schnee und Eis erarbeitet (Tabelle 3). Die definierten Lawinentypen zeichnen sich durch unterschiedliche optische Eigenschaften aus und sind meist einfach von Auge unterscheidbar.

Tabelle 3 International anerkannte Klassierung der Lawinentypen (UNESCO, 1981)

Zone	Kriterium	Charakteristika	
Ursprung	Anriss	Von einem Punkt (Lockerschneelawine)	A1
		Von einer Linie aus (Schneebrettlawine)	A2
		Weicher Schnee	A3
		Harter Schnee	A4
	Position der Gleitfläche	An der Oberfläche (Oberlawine)	B1
		In der Neuschneedecke	B2
		In der Altschneedecke	B3
		Am Boden (Bodenlawine)	B4
	flüssiges Wasser	Nicht vorhanden (Trockenschneelawine)	C1
		Vorhanden (Nassschneelawine)	C2
Translation	Hangform	Offener Hang (Flächenlawine)	D1
		Kanalisiert (Runsenlawine)	D2
	Bewegung	Staublawine	E1
		Fließlawine	E2
Ablagerung	Rauigkeit	Grob	F1
		Rechteckige Ablagerungselemente	F2
		Gerundete Ablagerungselemente	F3
		Fein	
	flüssiges Wasser	Nicht vorhanden	G1
		Vorhanden	G2
	Verschmutzungsgrad	Keine Verschmutzung vorhanden	H1
		Verschmutzung vorhanden	H2
		Schutt und Steine	H3
		Äste und Bäume	H4
		Trümmer von Gebäuden	H5

Zusätzlich werden auch die in Tabelle 4 aufgelisteten Merkmale zur Beschreibung von Lawinen verwendet. Zur Definition der Grösse von Lawinen werden die Begriffe in Tabelle 5 verwendet.

Tabelle 4 Ergänzende wichtige Typisierungsmerkmale von Lawinen (SLF, 2009a)

Merkmal	Namensgebung
Länge der Lawinenbahn	Tallawine (grosse Lawine, erreicht den Talgrund) Hanglawine (kleinere Lawine, bleibt am Hangfuss stehen)
Art des Schadens	Katastrophen- oder Schadenslawine Touristen- oder Skifahrerlawine
Art des anbrechenden Materials	Schneelawine Eislawine (Gletscherabbruch)

Tabelle 5 Beschreibung der Lawinengrößenklassen (CAA, 2002; SLF, 2009a)

Größenklasse/ Begriff	Reichweite	Schadenspotential	Quantitative Klassifikation
Grösse 1 Rutsch	Schneeverlagerung ohne Verschüttungsgefahr (aber Absturzgefahr).	relativ harmlos für Personen.	Lauflänge < 50 m Volumen < 100 m ³
Grösse 2 kleine Lawine	kommt im Bereich des Steilhangs zum Stillstand.	kann Personen verschütten, verletzen oder töten.	Lauflänge < 100 m Volumen < 1'000 m ³
Grösse 3 mittlere Lawine	erreicht den Hangfuss von Steilhängen.	Kann Personenwagen verschütten und zerstören, schwere Lastwagen beschädigen. Kann kleine Gebäude zerstören und einzelne Bäume brechen.	Lauflänge < 1'000 m Volumen < 10'000 m ³
Grösse 4 grosse Lawine	Überwindet flachere Geländeteile (deutlich unter 30°) über eine Distanz von mehr als 50 Metern. Kann den Talboden erreichen.	Kann schwere Lastwagen und Schienenfahrzeuge verschütten und zerstören. Kann grössere Gebäude und Waldgebiete zerstören.	Lauflänge > 1'000 m Volumen > 10'000 m ³

2.3.2. Lawinenopfer

In der Schweiz starben in den 30 Jahren von 1977 bis 2006 insgesamt 703 Personen in Lawinen, was einem Durchschnitt von 23,4 Personen pro Jahr entspricht (Harvey und Zweifel, 2008). Dies bedeutet, dass Lawinen in der Schweiz in den letzten 30 Jahren deutlich mehr Todesopfer forderten als jeder andere Typ von Naturkatastrophen. Dies ist hauptsächlich darauf zurückzuführen, dass Lawinen vergleichsweise häufig auftreten und meistens von den betroffenen Personen selbst ausgelöst werden (Schweizer und Jamieson, 2001). Weil sich immer mehr Leute in lawinengefährdeten Gebieten aufhalten, v.a. Personen auf Skitouren, Wintersportler abseits der Piste und Schneeschuhläufer, hat die Zahl der verschütteten Personen in den letzten Jahren zugenommen. Die Zahl der Todesopfer ist jedoch zurückgegangen. Insbesondere die durchschnittliche Zeit, während der ein vollständig verschüttetes Opfer begraben bleibt, ist signifikant verkürzt worden. Dies deutet darauf hin, dass sich die verbesserte Ausrüstung, neue Rettungstechniken und die intensivierete Ausbildung der Wintersportler auszahlen (Brugger et al., 2007; Harvey und Zweifel, 2008). Deutlich abgenommen hat auch die Zahl der Personen, welche in Gebäuden oder auf Verkehrswegen verschüttet werden. Dies belegt die Wirksamkeit der getroffenen technischen und planerischen Schutzmassnahmen (Etter et al., 2008; Tschirky et al., 2000). Im Verhältnis zur Anzahl Personen, welche sich in lawinengefährdeten Gebieten bewegen, ist die Zahl der Opfer relativ gering und vergleichbar mit den Todesopfern die im Gebirge an Herzschwäche und Erschöpfung sterben (Munter, 2003). Allerdings besteht das Risiko, dass die Zahl der Lawinenopfer in Wintern mit ungünstigem Schneedeckenaufbau plötzlich stark zunimmt.

2.3.3. Schäden an Gebäuden und Infrastrukturen

Die Zerstörungskraft von Lawinen ist enorm. Insbesondere grosse Staub- und Nassschneelawinen zerstören und beschädigen immer wieder Gebäude, Verkehrswege und weitere Infrastrukturen. In den Jahren 1980 bis 2007 verzeichneten die Elementarschadenversicherer durchschnittlich 9 Millionen Schweizer Franken an Schäden an Gebäuden (VKF, 2009). Allein im Jahr 1999, während des katastrophalen Lawinenwinters, waren es 76 Millionen Schweizer Franken. Die Gesamtschäden des Lawinenwinters 1999 werden mit über 600 Millionen Schweizer Franken beziffert (SLF, 2000). Trotz der in den letzten Jahrzehnten stark verbesserten Schutzmassnahmen für Gebäude und Infrastrukturen stellen Lawinen für zahlreiche Gebiete in den Schweizer Alpen nach wie vor eine grosse und finanziell bedeutende Bedrohung dar. Eine statistisch signifikante Veränderung der Lawinenaktivität kann innerhalb der letzten 50 Jahren in der Schweiz nicht festgestellt werden (Latenser und Schneebeil, 2002). Da zahlreiche Gebiete stark vom Tourismus abhängig sind, müssen auch die indirekten wirtschaftlichen Einbussen wie der Rückgang der Übernachtungen berücksichtigt werden, welche in der Regel deutlich höher sind als die direkten Kosten von Lawinenniedergängen (Nöthiger, 2003; Nöthiger und Elsasser, 2004).

2.3.4. Der Lawinenwinter 1999

Immer wieder haben extreme Schneefälle äusserst prekäre Lawinensituationen hervorgerufen. Solche Lawinenwinter traten beispielsweise in den Jahren 1808/09, 1887/88 und 1950/51 (vgl. Tabelle 2, S. 10) auf. Im Winter 1999 ereigneten sich kurz hintereinander drei Starkschneefallperioden, hervorgerufen durch eine Nordwestströmung. In rund 30 Tagen fielen verbreitet mehr als 5 Meter Schnee. Dies führte zu einer intensiven Lawinenaktivität in den Schweizer Alpen und dem benachbarten Ausland. Insgesamt gingen in den Schweizer Alpen in diesem Winter über 1200 Schadenlawinen nieder, zum Teil von noch nie gesehener Grösse. Zahlreiche Täler waren über mehrere Tage von der Umwelt abgeschnitten und waren nur über den Luftweg erreichbar (SLF, 2000). Dieses extreme Perioden hat gezeigt, dass Lawinen im Schweizer Alpenraum zu den Naturkatastrophen mit dem grössten Zerstörungspotential zählen (vgl. Abbildung 4). Zur Kartierung der niedergegangenen Grosslawinen wurden verschiedene Gebiete vom Bundesamt für Landestopographie swisstopo mit RC30 Luftbildkamern befliegen. Die Auswertung dieser Bilder nahm viel Zeit in Anspruch und der Winterbericht des Jahres 1999 wurde erst im Jahr 2008, also rund 10 Jahre später publiziert (Wiesinger und Adams, 2008). Eine verbesserte Methodologie zur automatisierten Erkennung und Kartierung der Lawinenablagerungen könnte den Auswertungsprozess beschleunigen. Dadurch könnten Informationen über aktuelle Lawinenereignisse schneller für die Verbesserung der in Kapitel 1 beschriebenen Anwendungen verfügbar gemacht werden.

Kapitel 3

Erhebung von lawinenrelevanten Parametern mit Fernerkundungsdaten

3.1. Einleitung

Lawinen sind komplexe Phänomene, deren Auftreten von sehr unterschiedlichen Parametern wie der Topographie, den meteorologischen Verhältnissen und den Schneedeckeneigenschaften beeinflusst werden. Diese Parameter beeinflussen sich oft gegenseitig und weisen meist bedeutende räumliche Variationen auf (Schweizer et al., 2008). Dies ist ein Hauptgrund dafür, dass einzelne Lawinen bis heute nicht zuverlässig vorhergesagt werden können. Durch die Analyse einiger Schlüsselparameter lassen sich aber fundierte Prognosen für die Lawinenaktivität in bestimmten Regionen ableiten (Buser, 1983; McClung und Schaerer, 2006; Schweizer und Föhn, 1996; Straub und Gret-Regamey, 2006). Diese Prognosen sind aber für einzelne Lawinenereignisse von beschränkter Aussagekraft, da die punktuellen Messungen angesichts der starken räumlichen Variabilität der Parameter für eine verlässliche Vorhersage von Einzelereignissen nicht ausreichen. Fernerkundung wird seit Jahrzehnten erfolgreich als Instrument für die Erhebung von Informationen über räumlich variable Phänomene eingesetzt. Daten können dabei kontinuierlich über grosse Flächen erhoben werden, was in Kombination mit Referenzdaten ein deutlich differenzierteres Bild der Realität liefert, als punktuelle Bodenmessungen alleine. In diesem Kapitel wird aufgezeigt, welche Parameter für die Kartierung von Lawinen besonders relevant sind und mit welchen Methoden sie vorwiegend erhoben werden. Zudem werden die Möglichkeiten der Fernerkundung für die Erhebung der räumlichen Variabilität dieser Parameter diskutiert.

3.2. Gelände

Wichtige Voraussetzungen für das Auftreten für Lawinen sind durch das Gelände gegeben. Diese Parameter können vergleichsweise einfach erhoben werden und Fernerkundungsdaten werden dazu bereits seit Jahrzehnten eingesetzt (ASPRS, 2001).

3.2.1. Hangneigung

Lawinen können, wie auch andere gravitative Prozesse (z.B. Erdrutsche oder Steinschläge) erst bei einer gewissen Steilheit des Geländes überhaupt auftreten. Gemeinhin ist die Faustregel bekannt, dass an Hänge mit einer Neigung von mehr als 30° besonders oft Anrissgebiete von Lawinen zu finden sind. Dieser Winkel entspricht ungefähr dem stabilen Schüttungswinkel von feinkörnigen Materialien

wie Schnee (Press und Siever, 2003). McClung und Schaerer (2006) siedeln die Hauptgefahrenzone bei Hangneigungen von 30° bis 45° an; bei diesen Winkeln ereignen sich mehr als zwei Drittel der von ihnen untersuchten Ereignisse. Die maximale Anzahl der Ereignisse liegt dabei bei ungefähr 40° Hangneigung. Allerdings treten vereinzelte Lawinen auch bei Neigungen von 20° bis 30° und 50° bis 60° auf. Ist die Neigung geringer als 20° , reicht die Gravitationskraft nicht aus, um das Material in Bewegung zu setzen. Ist die Neigung grösser als 60° , rutscht der Neuschnee sofort ab, und es kann keine genügend grosse Schneedecke akkumuliert werden, um einen Lawinnenniedergang zu speisen. Lockerschneelawinen treten tendenziell eher an steileren Hängen auf, während Nassschneelawinen auch bei geringerer Hangneigung ausgelöst werden können.

Verschiedene Untersuchungen beschäftigen sich mit der Analyse der Hangneigung im Zusammenhang mit der Auftretenswahrscheinlichkeit von Lawinen. Bei der Modellierung von potentiellen Lawinengebieten wird dieser Parameter aufgrund seiner überragenden Bedeutung allgemein verwendet. Der Einfluss der Genauigkeit eines digitalen Höhenmodells (DHM) auf die Resultate der Lawinensimulationen ist dabei bedeutend (Christen et al., 2002; Ghinoi und Chung, 2005; Maggioni und Gruber, 2003; Maggioni et al., 2002; Schaerer, 1977). Scheuner (2007) demonstriert in seiner Arbeit den Effekt von DHMs mit unterschiedlicher räumlicher Auflösung auf die Resultate der Simulation von gravitativen Prozessen.

Die Hangneigung kann direkt aus einem digitalen Höhenmodell errechnet werden. In vielen Regionen stehen genaue digitale Höhenmodelle, meist abgeleitet aus den Höhenlinien der topographischen Karten, zur Verfügung. Wo keine solchen Modelle verfügbar sind oder die Genauigkeit nicht ausreicht, bietet die Fernerkundung verschiedene Möglichkeiten, ein solches Modell abzuleiten (ASPRS, 2001). Photogrammetrische Methoden werden seit Jahrzehnten eingesetzt, um Höhenmodelle aus Bildern, aufgenommen aus unterschiedlichen Blickwinkeln, abzuleiten. Dies kann mit überlappenden Luftbildern, digitalen Luftbildscannern (z.B. ADS40) oder satellitengestützten Sensoren (z. B. SPOT-5, ASTER) geschehen. Die Genauigkeit des Höhenmodells ist dabei abhängig von der räumlichen Auflösung des Sensors. Präzisere Höhenmodelle lassen sich mit *Light Detection and Ranging* (LIDAR) Sensoren mit hoher Punktdichte erstellen. Dabei wird die Laufzeit eines Laserpulses verwendet, um den Abstand zwischen dem Sensor und der Erdoberfläche zu ermitteln. Diese Methode liefert hochpräzise DHMs sowie digitale Oberflächenmodelle (DOM), ist aber noch vergleichsweise teuer. Ist das Untersuchungsgebiet aber mit Wolken bedeckt, können diese beiden Methoden nicht oder nur bedingt eingesetzt werden. Die SAR-Interferometrie bietet dagegen die Möglichkeit, dank der geringen Beeinflussung der Radarwellen durch die Atmosphäre, auch bei dichter Bewölkung Daten aufzunehmen. Bekannt sind die frei verfügbaren Daten der *Shuttle Radar Topography Mission* SRTM welche die gesamte Erde zwischen 60° Nord und 58° Süd abdecken (Werner, 2001). Mit einer räumlichen Auflösung von 90 Metern sind diese Daten aber für viele Anwendungen nicht präzise genug. Für das Jahr 2009 ist die Mission TanDEM-X geplant, welche

mittels zweier TerraSAR-X Satelliten ein globales DHM mit einer deutlich verbesserten räumlichen Auflösung generieren soll (Krieger et al., 2007). Allerdings dringen langwellige Radarwellen in die trockene Schneedecke ein und erschweren dadurch die Berechnung eines genauen DOM über schneebedecktem Gebiet. Zudem treten im Hochgebirge störende Effekte wie *layover*, *foreshortening* und Radarschatten auf, welche zu Datenlücken führen (Lillesand und Kiefer, 2000).

3.2.2. Exposition und Höhenlage

Die Exposition und Höhenlage des Geländes wirken sich vor allem indirekt auf die Lawinengefährdung von Hängen aus. Insbesondere der Einfluss dieser Parameter auf die Windverhältnisse (Kap. 3.3.2) ist entscheidend. Liegt ein Hang im Lee, das heisst hinter einem zum Wind gewandten Grat, lagert sich dort oft Tribschnee ab. Solche Hänge sind besonders anfällig für Lawinenanrisse. Liegt der Hang aber auf der windzugewandten Seite des Grates, wird der Neuschnee weggeblasen und ein Lawinenanriss wird unwahrscheinlich. Die Exposition wirkt sich auch direkt auf die einfallende Sonnenstrahlung aus (Kap. 3.3.4). Schattenhänge stabilisieren sich meist deutlich langsamer als Hänge mit viel Sonneneinstrahlung. Zudem variiert die Temperatur (Kap. 3.3.3) sowie die Menge und Intensität des Niederschlags (Kap. 3.3.1) markant mit veränderter Höhenlage und Exposition. Dies hat einen gewichtigen Einfluss auf die Schneedeckenbildung und damit auf die Lawinengefahr (McClung und Schaerer, 2006).

Die Exposition und Höhenlage eines Gebietes kann, wie die Hangneigung, aus dem DHM abgeleitet werden und wird ebenfalls in verschiedenen Modellen verwendet (Christen et al., 2002; Ghinai und Chung, 2005; Maggioni und Gruber, 2003; Maggioni et al., 2002; Schaerer, 1977).

3.2.3. Geländeformen

Konvexe Geländeformen wie Kreten und konkave Formen wie Rinnen und Mulden beeinflussen die lokalen Windgeschwindigkeiten und damit die Transportkapazität des Windes für Schnee markant. In konkaven Geländeformen sammelt sich oft Tribschnee, während dieser auf konvexen Geländeformen oft weggeblasen wird. Zusätzlich treten an den Rändern von konvexen und konkaven Geländeformen oft sehr steile Hangpartien auf. Diese Eigenschaften machen sie zu gefährlichen Gebieten für Lawinenanrisse. Zudem lagert sich im Falle einer Lawine das Material oft metertief in konkaven Geländeformen ab, was sie zu einer tödlichen Falle für Verschüttete machen kann, sogenannte *snow traps* (McClung und Schaerer, 2006).

Solche Formen können ebenfalls aus dem DHM extrahiert werden, oft reicht aber die räumliche Auflösung dieser Modelle nicht aus, um auch kleinräumige Geländeformen zu erfassen. Dennoch werden Ansätze zur Integration dieses Parameters in Lawinensimulationen verwendet (Maggioni, 2005; Maggioni und Gruber, 2003).

3.2.4. Oberflächenrauigkeit

Die Oberflächenrauigkeit wird hauptsächlich durch den Typ der Bodenbedeckung bestimmt. Insbesondere die Bewaldung von Hängen hat im alpinen Raum einen entscheidenden Einfluss auf dessen Gefahrenpotential. Folgende Effekte sind dabei von vorrangiger Bedeutung: a) Verhinderung eines einheitlichen Aufbaus der Schneedecke, b) Erhöhung der Umgebungstemperatur und damit verminderte Bildung von instabilen Schichten c) Erhöhte Bindung der Schneedecke an den Untergrund und d) starke Bremswirkung auf rutschende Schneemassen (McClung, 2001; McClung und Schaerer, 2006). Die Oberflächenrauigkeit spielt aber auch in nicht bewaldeten Gebieten eine wichtige Rolle. Rasen mit langstieligen Gräsern oder glatte Felsoberfläche weisen einen deutlich geringeren Reibungswiderstand für die darüber liegende Schneedecke auf als zum Beispiel grosse Gesteinsblöcke. Die Oberflächenrauigkeit verliert aber ihre Bedeutung für die Lawinengefährdung sobald die Schwachschicht in der Schneedecke höher liegt als die jeweiligen Hindernisse und es sich nicht um Bodenlawinen handelt. Der Reibungswiderstand zwischen den Gleitschichten ist ein wichtiger Parameter für verschiedene Lawinensimulationsmodelle (Bartelt et al., 1999; Christen et al., 2002; Salm et al., 1990; Voellmy, 1955). Allerdings kann dieser Parameter immer nur als grobe Annäherung bestimmt werden, da die Rauigkeit der Oberfläche lokal stark variiert.

Fernerkundungsdaten eignen sich sehr gut für die grossflächige Kartierung der Oberflächenrauigkeit. Insbesondere die Unterscheidung zwischen bewaldeten und nicht bewaldeten Gebieten sowie die Zusammensetzung der Waldflächen ist im Alpenen Raum schon mehrfach mit unterschiedlichen Sensortypen untersucht worden (Hollaus et al., 2006; Kellenberger, 1996; Liu et al., 2005; Waser et al., 2008). Aber auch andere Typen von Bodenbedeckungsklassen lassen sich mit Fernerkundungsdaten grossräumig erfassen. Insbesondere SAR Sensoren sind dazu gut geeignet, da der Radar-Rückstreuoeffizient besonders sensitiv auf die Rauigkeit der Oberfläche reagiert (Evans et al., 1992; Lillesand und Kiefer, 2000; Singh et al., 1995). Bis heute werden solche Informationen aber nur vereinzelt im Zusammenhang mit Lawinen verwendet.

3.3. Wetter und Klima

Meteorologische Parameter tragen entscheidend zur Lawinengefährdung bei und interagieren stark mit den Geländeeigenschaften (Kap. 3.2). Nur bei ausreichend kalten Temperaturen und relativ hohem Niederschlag kann sich genug Schnee akkumulieren, um später als Lawine niederzugehen. Die meteorologischen Bedingungen während der Ablagerung der Schneedecke prägen zudem die Eigenschaften der Schichtung und damit die Stabilität der Schneedecke (vgl. Kap. 3.4.2) (McClung und Schaerer, 2006). Die Erfassung meteorologischer Daten hat im Schweizer Alpenraum eine lange Tradition. Meteorologie und Klimatologie zählen zudem zu den ältesten Anwendungsgebieten der Fernerkundung und sind ein Pa-

radebeispiel für den erfolgreichen operationellen Einsatz (Graham, 1985; Saunders und Seguin, 1992).

3.3.1. Niederschlag

Der abgelagerte Schnee und dessen spezifische Eigenschaften bilden die Grundlage für die Entstehung von Lawinen. Zudem führt das Gewicht von neu gefallenem Schnee zu einer Erhöhung der Spannungen innerhalb der Schneedecke, was die Gefahr von Lawinnenniedergängen meist deutlich erhöht. Von der Kondensation des Wasserdampfes an Kondensationskernen in der Atmosphäre bis zu Sedimentation der Schneekristalle in der Schneedecke verändern sich die Schneeeigenschaften wie Form, Grösse oder Bindung zwischen den Kristallen oft grundlegend. Die Kristallformen bei Neuschnee reichen von graupel- bis nadelförmig, abhängig von Parametern wie der Temperatur und dem Sättigungsdampfdruck. Treffen die Kristalle auf dem Boden auf, bilden sich, abhängig von Umgebungsparametern, Schichten, die von nachfolgenden Schneekristallen überdeckt werden. Die Veränderung der Kristalle endet damit aber keineswegs. Nun beginnt, beeinflusst vor allem durch den Temperaturgradienten in der Schneedecke, durch die vorhandene Feuchtigkeit und durch den Druck der darüber liegenden Schichten, die so genannte Metamorphose der Schneekristalle (vgl. Kap. 3.4.2). Trifft Niederschlag in flüssiger Form auf bereits abgelagerte Schneesichten, so wird der Gehalt an freiem Wasser in den Schichten erhöht. Dies kann zu Wassersättigung einzelner Schichten und damit zur Auslösung von Nassschneelawinen führen (McClung und Schaerer, 2006).

Die Niederschlagsmenge wird im Schweizer Alpenraum punktuell mit automatischen Stationen gemessen (Abbildung 7, (MeteoSchweiz, 2008a). Die Eigenschaften des Neuschnees werden heute hauptsächlich anhand internationaler Klassifikationssysteme vor Ort manuell erfasst (Colbeck et al., 1990). Die Intensität sowie die räumliche Verteilung der Niederschläge kann in Echtzeit mit Wetterradars (Dopplerradar) beobachtet werden (MeteoSchweiz, 2008b). Geht der Niederschlag als Schnee nieder, kann die Höhe der Schneedecke mit Radarsensoren gemessen werden (Schanda et al., 1983; Shi und Dozier, 2000b).



Abbildung 7 Messtationen des Bundesamtes für Meteorologie und Klimatologie MeteoSchweiz (MeteoSchweiz, 2008a)

3.3.2. Wind

Wind, in Kombination mit der Geländeform, spielt bei der Bildung von lawinengefährlichen Schneeakkumulationen eine bedeutende Rolle (McClung und Schaerer, 2006; Michaux et al., 2000). Abhängig von der Windgeschwindigkeit werden grosse Schneemengen von windexponierten Luv- in windgeschützte Lee-Gebiete transportiert. Während des Transportes werden die abgelagerten Schneekristalle abgerundet und in zum Teil mächtigen Schichten sehr dicht gepackt. Solche Triebsschneeablagerungen sind instabil und werden häufig als Schneebrettlawinen ausgelöst. Typische Beispiele für den Effekt von Triebsschneeablagerungen sind Wächten (Abbildung 8). Sie sind aufgrund der Bindungseigenschaften zwischen den Schneekristallen sehr bruchanfällig und können eine grosse Gefahr für Alpinisten darstellen.

Die Erfassung der kleinräumigen Variabilität der Windbedingungen bleibt ein grosses Problem in der Lawinenwarnung (Lehning und Fierz, 2008). Windrichtung und Geschwindigkeit werden im Schweizer Alpenraum, wie die Neuschneehöhe, punktuell mit automatischen Stationen gemessen (MeteoSchweiz, 2008a). Allerdings reicht die räumliche Auflösung des Messnetzes nicht aus, um fundierte Aussagen über die Ablagerung von Triebsschnee auf der räumlichen Skala von einzelnen Lawinenzügen zu machen. Anlagerungen an Hindernissen und vor allem Wächten geben aber Hinweise auf die Hauptwindrichtung. Die Windrichtung in früheren Ablagerungsperioden weicht meist deutlich von der letzten, erkennba-

ren Hauptwindrichtung ab. Fernerkundungssensoren werden für die Messung von Windrichtung und Geschwindigkeit im Alpenen Raum nicht eingesetzt. Es existieren zwar Anwendungen von Radar- und Lidarsensoren über Wasserflächen (Guissard, 1993; Mognard et al., 1991), diese Methoden eignen sich aber nicht für die Bestimmung von Windparametern über Landflächen.

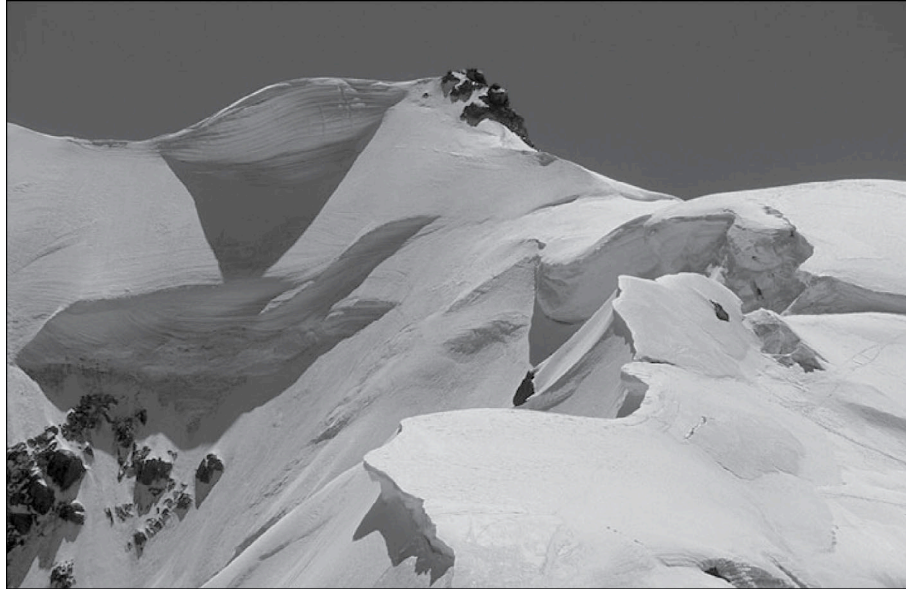


Abbildung 8 Mächtige Wächten, entstanden durch die Ablagerung von Tribschnee am Gipfelgrat der Mont Blanc Gruppe (www.top-wetter.de, Zugriff: 22. 07. 2008)

3.3.3. Lufttemperatur und Luftfeuchtigkeit

Die Umgebungstemperatur und der Feuchtigkeitsgehalt der Umgebungsluft beeinflussen die Schneekristalle in allen Stadien. Sie bestimmen sowohl die Eigenschaften des Neuschnees, wie auch die Metamorphose in der Schneedecke (Kap. 3.4.2). Besonders gefährlich ist dabei die Bildung von Oberflächenreif in sehr kalten Nächten bei hoher relativer Luftfeuchtigkeit. Diese grossen Kristalle besitzen eine hohe Widerstandsfähigkeit in vertikaler Richtung, kollabieren aber rasch bei geringer Belastung in horizontaler Richtung. Werden diese Schichten mit Neuschnee überlagert, entsteht eine so genannte Schwachschicht, auf der die darüber liegende Schneedecke als Lawine abgleiten kann. Bei einem sehr grossen Temperaturgradienten zwischen der Schneedeckenoberfläche und der Schneesicht direkt über dem Boden ($> 10\text{ }^{\circ}\text{C}$) entstehen, durch die aufbauende Metamorphose, Becherkristalle in den unteren Schichten (Abbildung 9). Diese haben ähnliche Eigenschaften wie der Oberflächenreif und dienen oft als Gleitschichten für Lawinen. Durch den Einfluss der Temperatur und Luftfeuchtigkeit auf die Bildung von Schwachschichten sind diese Parameter für die Abschätzung der Lawinengefahr von grosser Bedeutung. Allerdings können diese Parameter, abhängig vom Relief, zeitlich und räumlich stark variieren, was eine präzise Prognose für Schwachschichten verunmöglicht (McClung und Schaerer, 2006).

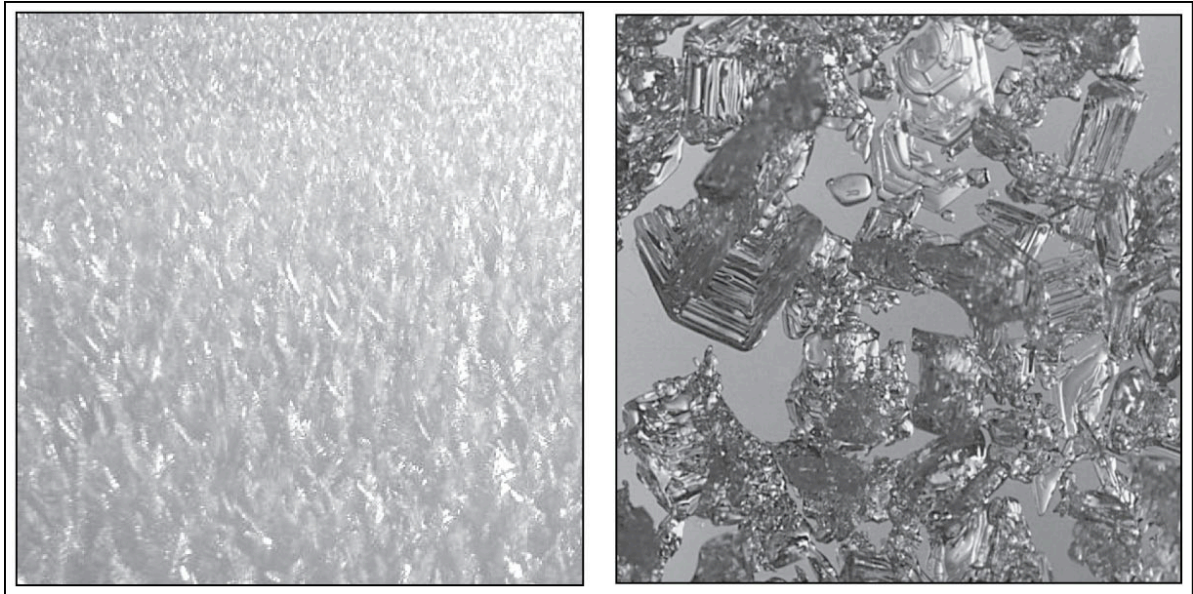


Abbildung 9 Nahaufnahme von Oberflächenreif abgelagert durch Sublimation nach einer kalten Nacht mit hoher relativer Luftfeuchtigkeit (links) und Becherkristalle aus einer unteren Schicht der Schneedecke (www.avalanche.org/~uac/encyclopedia, www.avalanche.org/~nai/knowledge_base.htm, Zugriff: 22. 07. 2008)

Temperatur und Luftfeuchtigkeit werden im Schweizer Alpenraum, wie alle hier aufgeführten meteorologischen Parameter, mit automatisierten Stationen gemessen (Abbildung 7, (MeteoSchweiz, 2008a)). Dieses Messnetz ist allerdings nicht eng genug, um genügend Informationen für die Lawinenwarnung zu generieren. Fernerkundungsmethoden können eingesetzt werden, um sowohl die räumliche Verteilung der Temperatur, wie auch der Luftfeuchtigkeit zu bestimmen (Kelkar, 2007). Die benötigte hohe zeitliche Auflösung von wenigen Stunden ist aber noch nicht mit genügender räumlicher Auflösung verfügbar. In Zukunft könnten aber solche Ansätze aufgrund der erhöhten Verfügbarkeit von Sensoren und verbesserter räumlicher Auflösungen durchaus dienlich sein. Experimente mit einer bodengestützten Thermalkamera haben bereits interessante Ergebnisse geliefert (Tanner und Föhn, 1999).

3.3.4. Sonneneinstrahlung

Direkte und indirekte Sonneneinstrahlung auf die Schneedecke steuert, im Zusammenspiel mit der Konvektion und der Wärmeleitung, den Temperaturhaushalt der Schneedecke. Damit trägt sie massgeblich zum Aufbau und zur Metamorphose der Schneedecke bei. Bei starker Sonneneinstrahlung an Südhängen gehen im Frühling oft Nassschneelawinen nieder. Liegt ein Hang dagegen die meiste Zeit im Schatten und erhält nur wenig direkte Sonneneinstrahlung, kann dies die Bildung von starken Bindungen zwischen den Schneekristallen verhindern und Schwachschichten können lange Zeit bestehen bleiben (McClung und Schaerer, 2006). Die Sonnenscheindauer wird im Schweizer Alpenraum ebenfalls mit automatisierten Stationen gemessen (MeteoSchweiz, 2008a). Durch den Einbezug eines digitalen Geländemodells (Exposition und Hangneigung), dem Sonnenstand und Atmosphärenparametern kann die Strahlungsenergie, welche ein bestimmtes

Gebiet erhält, berechnet werden. Weitaus präzisere Messungen der Strahlung werden am *World Radiation Center* in Davos durchgeführt.

3.4. Schneedecke

Der Aufbau der Schneedecke und die Eigenschaften ihrer Schichten sind für die Lawinengefährdung von grundlegender Bedeutung. Gesteuert durch verschiedene interne und externe Einflüsse variieren diese Parameter räumlich und zeitlich stark. Deshalb ist eine präzise lokale Lawinenprognose bis heute nicht möglich (Schweizer et al., 2008). Die Eigenschaften der Schneedecke sind direkt abhängig vom Wetter, Klima (Kap. 3.3) und den topografischen Faktoren (Kap. 3.2). Insbesondere die optischen Eigenschaften von Schnee sind für die Erkennung und Kartierung von Lawinen mit Fernerkundungsdaten wichtig, da sie für das Verständnis der von optischen Sensoren gemessenen Signale fundamental sind. Deshalb werden sie in diesem Kapitel kurz erläutert, auch wenn sie nicht im direkten Zusammenhang mit der Lawinengefährdung stehen. Diese Parameter werden in den nachfolgenden Kapiteln teilweise für die Analyse der Fernerkundungsdaten verwendet.

3.4.1. Räumliche Verteilung der Schneebedeckung

Lawinen können sich nur in schneebedeckten Gebieten lösen. Aus diesem Grund ist die Information über die Ausdehnung der Schneedecke eine Grundlage für Lawinenuntersuchungen. Zusätzlich wird dieser Parameter aber auch für zahlreiche weitere Anwendungen in der Hydrologie und der Klimatologie benötigt (Rees, 2006). Aufgrund des starken Kontrastes im sichtbaren Bereich des elektromagnetischen Spektrums zwischen Schnee und den anderen Bodenbedeckungstypen wurde das Potential der Fernerkundung für die Kartierung von Schnee schon sehr früh erkannt und eingehend erforscht (Haefner et al., 1997; Rango und Itten, 1976; Seidel et al., 1993; Tarble, 1963). Aufgrund der spektralen Eigenschaften von Schnee und Wolken im kurzwelligen Infrarotbereich des Spektrums, können diese gut unterschieden werden. Dazu wird oft der *Normalized Difference Snow Index* NDSI verwendet (Dozier, 1989). In verschiedenen Arbeiten wurden auch bewölkungsunabhängige SAR-Sensoren eingesetzt (Koskinen et al., 1999; Schanda et al., 1983). Die Schneebedeckungskartierung im Schweizer Alpenraum wird heute operationell mit NOAA-AVHRR Daten in Kombination mit in situ Messungen durchgeführt (de Ruyter de Wildt et al., 2007; Foppa et al., 2007).

3.4.2. Schichtung und Stabilität

Die Schichtung in der Schneedecke und ihre Stabilität können zeitlich und räumlich sehr stark variieren. Sobald Neuschnee auf der Schneedecke abgelagert wird, beginnen sich die Schneekristalle zu verändern. Im Zusammenspiel mit der Temperatur und dem Wasserdampfgehalt der Luft (Kap. 3.3.3) können sich ganz unterschiedliche Schichten bilden. Die Komposition und Stabilität der Schichten sind entscheidend für die Gefährdung eines Gebietes durch Lawinen. Insbeson-

dere Schwachschichten wie Oberflächenreif oder Becherkristalle (Kap. 3.3.3) können, falls sie von Schichten mit einer hohen Kohäsion überlagert sind, zu Lawenniedergängen führen. Die Eigenschaften der Schichten in der Schneedecke werden vor Ort mit verschiedenen Methoden erfasst. Schneeprofile geben Aufschluss über die Schichtung innerhalb einer Schneedecke und erlauben es, Schwachschichten zu erfassen. Penetrometer geben Aufschluss über die Härte der einzelnen Schichten. Rutschblocktests werden eingesetzt, um die tatsächliche Stabilität einer Schneedecke abzuschätzen. Es existieren noch zahlreiche weitere Methoden um vor Ort Informationen über die Schichtung und Stabilität einer Schneedecke zu erhalten (McClung und Schaerer, 2006).

Fernerkundungsmethoden werden für die Erhebung dieser Parameter aber noch kaum eingesetzt, da die benötigte räumliche Auflösung und die geringe Eindringtiefe der optischen Wellenlängen beträchtliche Probleme darstellen. Für die Analyse von Schneeprofilen werden aber bereits heute Infrarotkameras eingesetzt (Matzl und Schneebeli, 2006). Zudem wurde bei einem Vergleich von Daten eines micro-Penetrometers mit einem bodengestützten *Frequency Modulated Continuous Wave* FMCW Radar vielversprechende Resultate erzielt (Marshall et al., 2007). Flugzeug- oder satellitengestützte Sensoren wurden bis heute noch kaum eingesetzt.

3.5. Optische Eigenschaften von Schnee

Schneebedeckte Flächen reflektieren im sichtbaren Bereich des elektromagnetischen Spektrums, im Vergleich zu den meisten anderen Bodenbedeckungsarten, einen sehr grossen Anteil der einfallenden Strahlung. Die Reflektanz des Schnees ist hauptsächlich abhängig von der Wellenlänge, dem Einstrahlungs- und Beobachtungswinkel, der Korngrösse, dem Anteil an freiem Wasser und dem Gehalt an Fremdmaterial (Warren, 1982). Diese Eigenschaften sind bereits intensiv untersucht worden. In diesem Kapitel wird ein kurzer Überblick über die wichtigsten Ergebnisse der Forschung gegeben.

3.5.1. Wellenlänge

Schnee reflektiert den Grossteil der elektromagnetischen Strahlung im sichtbaren Bereich ($0.4 - 0.7 \mu\text{m}$), zeigt aber ein verstärktes Absorptionsverhalten im kurzwelligen Infrarot ($1.1 - 2.5 \mu\text{m}$). Das Reflexionsverhalten ist dabei vor allem abhängig von den nachfolgend beschriebenen Parametern (Casacchia et al., 2001; Dozier, 1989; Warren, 1982). Abbildung 10 zeigt exemplarisch Spektralkurven von unterschiedlichen Schnee- und Eistypen.

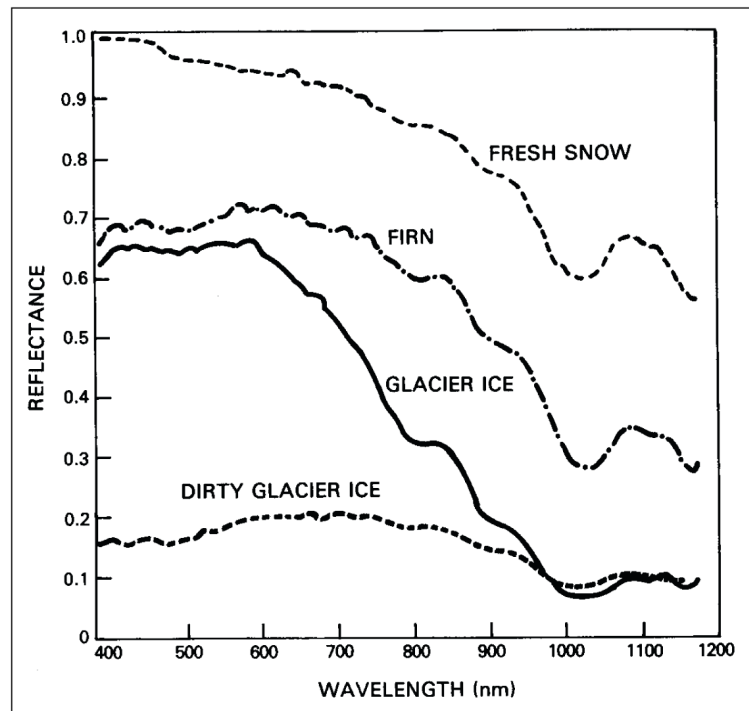


Abbildung 10 Spektrale Eigenschaften von Schnee und Eis (Hall und Martinec, 1985)

3.5.2. Direktionale Eigenschaften

Die unterschiedlichen Schneeoberflächen zeigen deutliche anisotrope Effekte. Das heisst, die einfallende Strahlung wird nicht gleichmässig in alle Richtungen reflektiert, sondern bevorzugt in eine Richtung. Verschiedene Untersuchungen haben gezeigt, dass alle Typen von Schnee ausgeprägt vorwärtsgerichtete Streueigenschaften (*forwardscattering*) aufweisen (Warren, 1982). Die Intensität dieses Reflektionsmaximums in die der Sonne entgegengesetzte Richtung auf der Sonnehauptebene ist aber ebenfalls abhängig von anderen Parametern wie Wellenlänge oder Gehalt an freiem Wasser. Diese Eigenschaft ist bei trockenem Neuschnee deutlich ausgeprägter vorhanden als bei nassem Schnee (Painter, 2002; Peltoniemi et al., 2005; Wiscombe und Warren, 1980). Abbildung 11 zeigt das Reflexionsverhalten von Schnee abhängig von der Illuminations- und Betrachtungsrichtung. Die direktionalen Effekte innerhalb eines Lawinenkegels können für die Kartierung von Lawinen hilfreich sein (vgl. Kapitel 5).

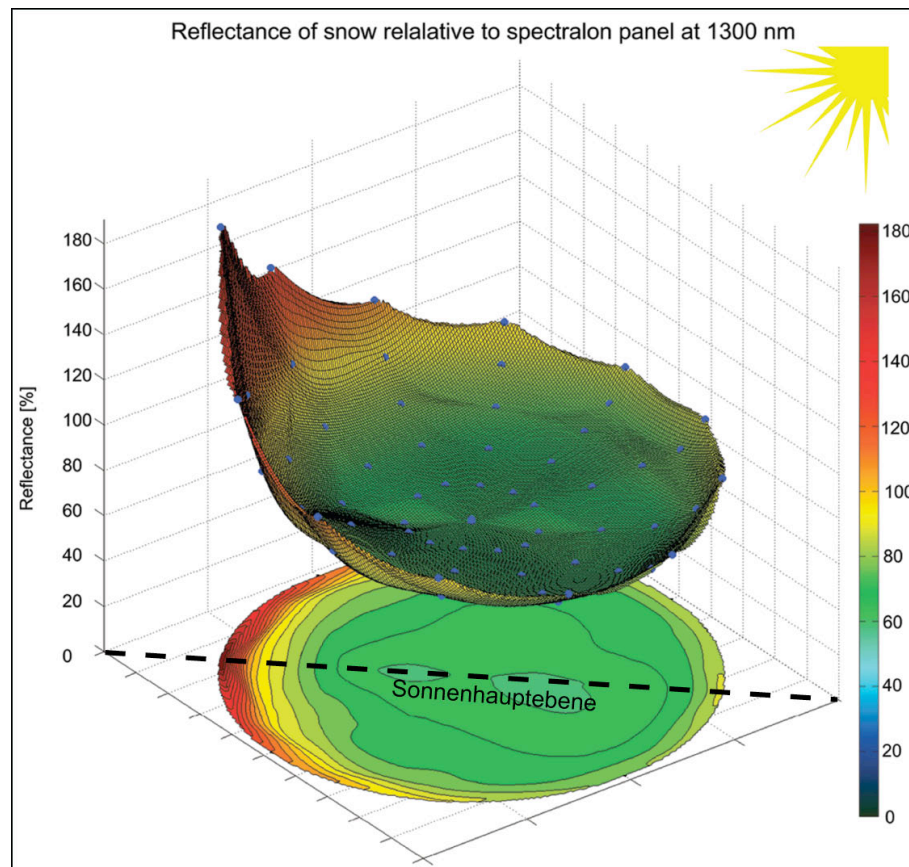


Abbildung 11 Goniometer-Messung der Reflektanz von Neuschnee bei einer Wellenlänge von 1300 nm. Das *forwardscattering* in der Sonnenhauptebene ist deutlich sichtbar, modifiziert nach (Rey, 2008)

3.5.3. Korngrösse und Form

Mit zunehmendem Alter wachsen die grossen Eiskörner in der Schneedecke, aufgrund der Metamorphose, auf Kosten der kleineren Körner. Die Form ändert sich ebenfalls hin zu abgerundeten, kompakten Körnern (McClung und Schaerer, 2006). Allerdings bestehen Schneedecken nur selten aus klar voneinander trennbaren Körnern sondern eher aus einem Korngefüge. In der Literatur wird aber dennoch hauptsächlich der Begriff Korngrösse verwendet. Laboruntersuchungen haben die Abhängigkeit der Reflektanz von der Grösse und Form der Schneekristalle bewiesen. Insbesondere im Wellenlängenbereich von ca. 1.0 bis 1.3 μm , in dem Eis stark absorbiert, ändert sich die Reflektanz signifikant mit variiertem durchschnittlichem Durchmesser der Eiskörner (Nolin und Dozier, 2000; Painter et al., 2003; Wiscombe und Warren, 1980). Dieses Wissen wurde in verschiedenen Studien angewendet, um die räumliche Verteilung der Korngrösse mittels Fernerkundungsdaten zu ermitteln (Fily et al., 1997; Nolin und Dozier, 1993; Painter et al., 2003; Tanikawa et al., 2002). In der Praxis werden die Form und Grösse des Korngefüges aber meist vor Ort gemessen. Beim turbulenten Transport von Schnee in einer Lawine werden meistens Schichten verschiedenen Alters und damit mit unterschiedlichen Korngrössen durchmischt. Folglich besitzt dieser Parameter ein Potential für die Kartierung von Lawinen (vgl. Kapitel 4). Abbildung 12 zeigt die Reaktion der Reflektanz auf unterschiedliche Korngrössen, abhängig von der Wellenlänge.

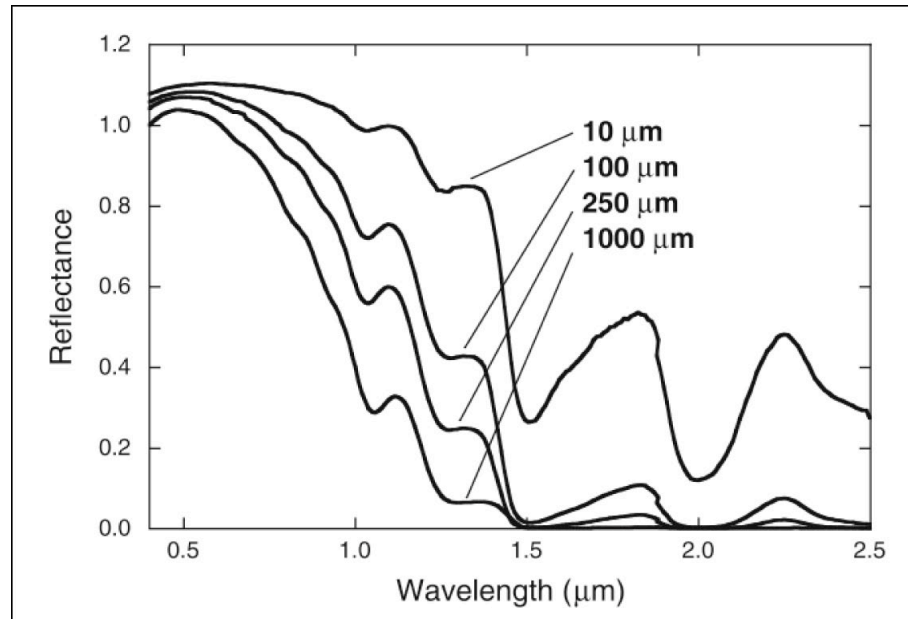


Abbildung 12 Spektralkurven der Reflektanz von Schnee, abhängig von der Korngröße (Painter, 2002)

3.5.4. Gehalt an freiem Wasser

Da die Eindringtiefe der elektromagnetischen Strahlung in den Wellenlängenbereichen, in denen Wasser und Eis sich deutlich unterscheiden, nur relativ gering ist, können Aussagen über den Gehalt von flüssigem Wasser nur für die obersten Schichten gemacht werden (Dozier und Painter, 2004). Dennoch beeinflusst der Flüssigwassergehalt der Schneedecke deren optische Eigenschaften (Peltoniemi et al., 2005; Warren, 1982). Mit aktiver Mikrowellenstrahlung, vor allem im C-Band, können aber auch Aussagen über den Flüssigwassergehalt der gesamten Schneedecke gemacht werden (Schanda et al., 1983; Shi und Dozier, 2000a; Shi und Dozier, 2000b; Strozzi und Mätzler, 1998). Obwohl dieser Parameter vor allem für die Abschätzung des Gefahrenpotentials für Nassschneelawinen sehr wichtig wäre, sind die Fernerkundungsmethoden noch nicht weit genug fortgeschritten, um die räumliche Verteilung des Flüssigwassergehaltes in der Schneedecke großflächig und mit ausreichender Genauigkeit zu erfassen. Dieser Parameter wird deshalb meist vor Ort gemessen.

3.5.5. Fremdmaterialgehalt

Der sichtbare Bereich des elektromagnetischen Spektrums reagiert sehr sensitiv auf Verunreinigungen im Schnee (Warren und Wiscombe, 1980). Dadurch ist dieser Parameter mit verschiedenen Fernerkundungssensoren einfach erfassbar. So nutzen Painter et al. (2001) einen flugzeuggestützten Sensor, um Schneegalgen zu kartieren. Meist wird dieser Parameter aber anhand von Stichproben vor Ort erhoben. Da Lawinen häufig Fremdmaterialien vom Boden oder aus älteren Schneeschichten auf die Schneeoberfläche transportieren, kann dieser Parameter für die Kartierung von Lawinen nützlich sein. Allerdings nicht bei Lawinen welche nur die oberen, unverschmutzten Schichten tangieren.

3.6. Kartierung von Lawinnenniedergängen

Die Erhebung von Daten über die Lage und den Wirkungsbereich von Lawinenereignissen ist wichtig für verschiedene Anwendungen (vgl. 1.3). Allerdings werden solche Daten heute noch kaum systematisch erfasst.

Die meistgebrauchte und mit Abstand wichtigste Art der Datenerhebung ist nach wie vor die Beobachtung im Feld. Die Schadenlawinen werden in der Schweiz mit dieser Methode erhoben und in eine Lawinendatenbank eingetragen (Bründl et al., 2004; SLF, 2002). Ausgebildete Lawinenbeobachter tragen zusätzliche Lawinen, welche keine Schäden verursachen, in eine ergänzende digitale Datenbank mit dem Namen AVALMAP ein. Weil aber die digitale Datenbank erst seit wenigen Jahren im Einsatz und noch nicht für alle Gebiete im Schweizer Alpenraum verfügbar ist, liegen zahlreiche Beobachtungen in analoger Form vor. In Nordamerika existiert das open source System AVALANCHE MAPPING (www.avalanchemapping.org/index.htm, Zugriff: 24. 07. 2008), in dem Freiwillige Daten über beobachtete Lawinnenniedergänge eintragen. Diese Daten werden verwendet, um GIS-basierte Modellierungen von Lawinenzügen zu berechnen, und daraus einen Lawinen-Atlas abzuleiten. Auch in den Pyrenäen sind einige solche Lawinenkarten erstellt worden (Furdada et al., 1995). Das grundsätzliche Problem dieses Ansatzes ist aber, dass solche Beobachtungen nur punktuell stattfinden und es muss davon ausgegangen werden, dass der Grossteil der Lawinenereignisse nicht erfasst wird. Zudem gibt es zahlreiche Gebiete, welche aufgrund der eingeschränkten Zugänglichkeit nicht beobachtet werden können. Gerade solche Gebiete sind aber angesichts der Veränderung des Klimas und dem sich verstärkenden Siedlungsdruck, auch auf entlegene Regionen, von grossem Interesse.

Fernerkundung ist ein weit verbreitetes Mittel für die Überwachung und Kartierung von Naturkatastrophen, welches in den letzten Jahren stetig an Bedeutung gewonnen hat. So existieren zum Teil bereits operationelle Anwendungen für die Kartierung von Ereignissen wie Erdbeben (Huggel et al., 2002; Käab et al., 2005; Mantovani et al., 1996; Metternich et al., 2005; Nichol und Wong, 2005) oder Überschwemmungen (Bessis et al., 2004; Bonn und Dixon, 2005; Buehler et al., 2006; Henry et al., 2003; Tralli et al., 2005; Zhang et al., 2002). Auch für die Erkennung und Kartierung von Lawinnenniedergängen hat der Einsatz von Fernerkundungsdaten bereits Tradition. So wurden im Lawinenwinter 1999 verschiedene Luftbilder eingesetzt, um die unzähligen Lawinen zu erfassen (Budmiger und Budmiger, 2000; Wiesinger und Adams, 2008). Bereits in den Jahren zuvor wurden dazu vereinzelt Luftbilder eingesetzt (Jenne, 1989). Die Auswertung der Fernerkundungsdaten erfolgt bis heute in den meisten Fällen durch analoge Interpretation von Experten. Diese Methode hat den Vorteil, dass Expertenwissen direkt in die Auswertungen einfließt. Allerdings ist diese Methode sehr aufwändig, benötigt viel Zeit und einzelne Ereignisse können übersehen werden. Zudem ist die Bildinterpretation aufgrund des geringen Kontrastes innerhalb der schneebedeckten Gebiete anspruchsvoll und fehleranfällig. Aus diesen Gründen ist diese Methode nur bedingt geeignet, um Lawinen regelmässig über grosse Gebiete zu

detektieren. Vallet et al. (2000) setzen für die Kartierung einzelner Lawinenereignisse eine helikoptergestützte Kamera ein. Dieser Ansatz eignet sich sehr gut für die Erfassung von ausgewählten Einzelereignissen, aufgrund der eingeschränkten Flughöhe und den Eigenschaften des Sensors aber nicht für eine grossflächige Kartierung. Wiesmann et al. (2001) verwenden ERS- 1/2 SAR-Daten, um Lawinenkegel von grossen Tallawinen zu kartieren. Diese Methode hat den Vorteil, dass SAR-Daten nahezu wetterunabhängig sind und grosse Gebiete untersucht werden können. Da die Methode aber auf *change detection* basiert, wird ein Datensatz vor dem Ereignis und einer nach dem Ereignis benötigt. Bei mangelhafter Kohärenz dieser beiden Datensätze können zahlreiche Fehler entstehen. Aufgrund der räumlichen Auflösung von 30 Metern ist zudem fraglich, ob auch mittlere bis kleinere Lawinenkegel erfasst werden können. Zusätzliche Forschungsarbeiten sind nötig um die Eignung dieser Methode für die Erfassung und Kartierung von Lawinenkegeln zu evaluieren.

3.7. Synthese

Lawinen sind komplexe Phänomene, die durch sehr unterschiedliche Parameter beeinflusst werden. Diese Parameter sind räumlich und zeitlich variabel und beeinflussen sich oft gegenseitig. Eine genaue Prognose von einzelnen Lawinenereignissen ist aus diesen Gründen heute noch nicht möglich. Fernerkundungssensoren können Daten über grossräumige Gebiete erheben. Diese Informationen können eingesetzt werden, um die räumliche und teilweise auch die zeitliche Variabilität verschiedener Parameter abzuschätzen.

Die wichtigsten topografischen Parameter sind Hangneigung, Exposition und Höhenlage, Geländeform und Oberflächenrauigkeit (Kap. 3.2). Für die Erhebung der Oberflächenrauigkeit sind Fernerkundungsdaten prädestiniert. Für die Abschätzung der anderen Parameter werden hauptsächlich digitale Geländemodelle eingesetzt. Die Erhebung von Geländemodellen mit Fernerkundungsdaten und Methoden ist gut erforscht und hat eine lange Tradition. Mit neuen Methoden und steigender Genauigkeit dieser Daten können in Zukunft präzisere Geländemodelle erzeugt werden. Dadurch wird auch die Qualität der bestehenden Lawinenprognosen und Lawinenmodelle zunehmen.

Meteorologische Grössen wie Niederschlag, Wind, Lufttemperatur und Feuchtigkeit zeichnen sich vor allem durch eine hohe zeitliche Variabilität aus. Im Schweizer Alpenraum werden diese Parameter vorwiegend punktuell mit automatisierten Messstationen erhoben. Die Dichte dieses Messnetzes ist aber noch nicht hoch genug, um die benötigten Informationen für präzise Lawinenvorhersagen auf lokaler Ebene zu generieren. Zusätzlich interagieren diese Parameter sehr stark mit den Geländeeigenschaften. Fernerkundungsdaten haben sich für die Erhebung von Meteorologischen Parametern auf kontinentalem Massstab etabliert. Auf lokalem Massstab, welcher für Lawinenprognosen entscheidend ist, werden sie aber noch kaum eingesetzt. Weitere Sensorsysteme sind nötig, um in Zukunft meteo-

rologische Parameter mit einer hohen räumlichen und zeitlichen Auflösung auf lokaler Ebene erheben zu können.

Die Schichtung und die Stabilität der Schneedecke sind die entscheidenden Faktoren für die Lawinengefährdung eines Gebietes. Sie werden massgeblich durch die räumlich und zeitlich variablen meteorologischen Parameter und die Geländeeigenschaften bestimmt. Weil die meteorologischen Parameter zeitlich und räumlich stark variieren, ist auch die Variabilität der Schneedeckeneigenschaften meist sehr gross. Diese Eigenschaften heute vorwiegend mit Messungen vor Ort bestimmt. Aufgrund der geringen Eindringtiefe der optischen elektromagnetischen Strahlung in die Schneedecke werden optische Fernerkundungssensoren noch wenig für die Erhebung dieser Parameter eingesetzt. Allerdings werden die optischen Eigenschaften verschiedener Schneedeckenparameter intensiv erforscht. Ihre Bedeutung für die Erhebung der räumlichen Variabilität dieser Parameter könnte deshalb in Zukunft zunehmen. Radar-Sensoren werden bereits heute verwendet, um die räumliche Verteilung einzelner Schneedeckeneigenschaften zu erheben.

Die Kartierung von Lawinenniedergängen wird heute hauptsächlich mittels Beobachtungen im Feld durchgeführt. Dabei werden aber zahlreiche Ereignisse, vor allem in schlecht zugänglichem Gelände, nicht erfasst (vgl. 1.3, S. 2). Obwohl Lawinenkegel in hoch aufgelösten Fernerkundungsdaten von Auge meist erkennbar sind, existiert keine Methode zur automatisierten Erkennung und Kartierung von Lawinen. Diese Lücke soll mit der vorliegenden Forschungsarbeit zumindest teilweise geschlossen werden.

Kapitel 4

Charakterisierung der spektralen Eigenschaften von Lawinenablagerungen

4.1. Einleitung

Die Variation der reflektierten elektromagnetischen Strahlung lässt Rückschlüsse auf verschiedene Parameter der Schneeoberfläche zu. Bereits in den 1980er Jahren erforschten Warren und Wiscombe die spektralen Eigenschaften unterschiedlicher Schneetypen (Warren, 1982; Warren und Wiscombe, 1980; Wiscombe und Warren, 1980). Messbare Auswirkungen auf die über das Spektrum variierende Reflektanz von Schneeoberflächen haben primär die Korngrösse, der Gehalt an freiem Wasser sowie der Fremdmaterialanteil im Schnee (vgl. 3.4).

Lawinenkegel und die ungestörte Schneedecke setzen sich, abgesehen von stark verschmutzten Kegeln, hauptsächlich aus einheitlichem Material zusammen. Weil aber Lawinen während des Niedergangs höher gelegene Schichten ins Tal transportieren sowie unterschiedliche Schneeschichten durchmischen, liegt die Vermutung nahe, dass einige spektral messbare Schneeparameter existieren, welche die Lawinenkegel von der ungestörten Schneedecke unterscheiden. Über die spektralen Eigenschaften von Lawinenkegeln existieren bis heute, nach Wissen des Autors, keine Publikationen. In diesem Kapitel wird untersucht, ob Lawinenkegel mittels spektralen Informationen von der angrenzenden, ungestörten Schneedecke unterschieden und abgegrenzt werden können.

Mit optischen Methoden können allerdings nur Informationen über die Oberfläche einer Schneedecke erhoben werden, ein Einblick in tiefere Schichten ist dagegen nur mit Mikrowellensensoren möglich (Markus et al., 2006; Schaffhauser et al., 2008; Schanda et al., 1983). Fernerkundungssensoren im Allgemeinen sind ein wertvolles Werkzeug zur Erhebung von Schneeparametern auch in unzugänglichem Gelände wie dem Hochgebirge, da sie kontinuierlich und flächendeckend Daten aufnehmen können. So setzten Dozier und Painter (2004) Landsat Thematic Mapper Daten zur Charakterisierung der alpinen Schneedecke ein. Gupta et al. (2005) untersuchten den Feuchtigkeitsgehalt von verschiedenen Schneeoberflächen im Himalaya mit dem indischen Sensor IRS LISS III. Sharma et al. (2004) nutzten die fernerkundliche Erfassung von Veränderungen im freien Wassergehalt der Schneedecke, um die Lawinenwarnung im Himalaja zu verbessern. Weiterführende Versuche, die Beobachtungen von Fernerkundungssensoren mit der Entstehung und dem Niedergang von Lawinen zu verknüpfen, wurden bislang kaum publiziert.

4.2. Hypothese

Hypothese für dieses Kapitel:

Die spektralen Eigenschaften von Lawinenkegeln und der ungestörten Schneedecke mit vergleichbarer Exposition und Hangneigung unterscheiden sich messbar. In situ Messungen mit einem Spektroradiometer können diese Unterschiede erfassen.

Um diese Hypothese verifizieren zu können, müssen folgende Fragen geklärt werden:

- Existieren messbare spektrale Unterschiede zwischen Lawinenkegeln und der angrenzenden, ungestörten Schneedecke?
- Bei welchen Wellenlängen oder Parametern (*features*) treten Unterschiede auf und wie können diese optimal erfasst werden?
- Treten diese spektralen Unterschiede bei allen Lawinentypen auf?
- Wie wirken sich unterschiedliche Bedingungen der in situ Messungen auf die Vergleichbarkeit der Spektren aus?

4.3. Datengrundlage

Während des Winters 2007/08 wurden im Raum Davos Spektren von neun Lawinenkegeln sowie von der angrenzenden, ungestörten Schneedecke mit dem Feld-Spektroradiometer ASD FieldSpec®3 erhoben. Vergleichbare Geräte wurden bereits erfolgreich für die spektrale Charakterisierung von unterschiedlichen Untersuchungsobjekten wie Pflanzen (Kneubühler, 2002; Schmidt und Skidmore, 2003) oder Böden (Kusumo et al., 2008) eingesetzt. Das ASD FieldSpec®3 Spektroradiometer misst das reflektierte Sonnenlicht mit einem Öffnungswinkel (*field of view*) von 25° im Wellenlängenbereich von 350 bis 2500 nm, also vom sichtbaren Bereich des elektromagnetischen Spektrums bis zum kurzwelligen Infrarot. Das Gerät verfügt über eine spektrale Bandbreite von 3 nm im Bereich 350 bis 1000 nm und von 10 nm im Bereich von 1000 bis 2500 nm. Das *sampling intervall* beträgt für den kurzwelligen Bereich 1,4 nm und für den langwelligen Bereich 2 nm (Analytical Spectral Devices Inc., 2007). Die Messungen wurden lotrecht in einem Abstand von ca. 50 cm über den Untersuchungsobjekten durchgeführt. Die Bänder wurden sensorintern auf ein *sampling interval* von 1 nm interpoliert, damit eine Messung pro Wellenlänge erfasst wird. Aufgrund der Messgeometrie wird mit einem Spektroradiometer nicht die Reflektanz sondern der hemisphärisch-konische Reflektanzfaktor (HCRF) gemessen (Schaepman-Strub et al., 2009). Der Reflektanzfaktor der Messobjekte wird mittels Normierung auf das Spektrum einer Referenzplatte (Spektralon) ermittelt. Die Referenzplatte zeigt angenähert ein lambertianes Spektralverhalten und reflektiert nahezu 100% der Strahlung (Schopfer, 2008). In dieser Arbeit wird für den HCRF vereinfachend der Begriff Reflektanz verwendet. Jeweils zehn Folgemessungen werden intern gemittelt, um das Rauschen zu minimieren. Um beleuchtungsbedingte Effekte zu reduzieren, wurde bei

der Auswahl der Messorte darauf geachtet, dass die ungestörte Schneedecke dieselbe Hangneigung und Exposition aufwies wie der zugehörige Lawinenkegel und möglichst zeitgleich aufgenommen wurde. Ein Vergleich der Messungen an den unterschiedlichen Messstandorten ist aufgrund der variierenden Messbedingungen nur mit Vorbehalten zulässig. Abbildung 13 zeigt die Lage der untersuchten Lawinenkegel. Tabelle 6 charakterisiert die durch die Messungen angesprochenen Lawinenereignisse.

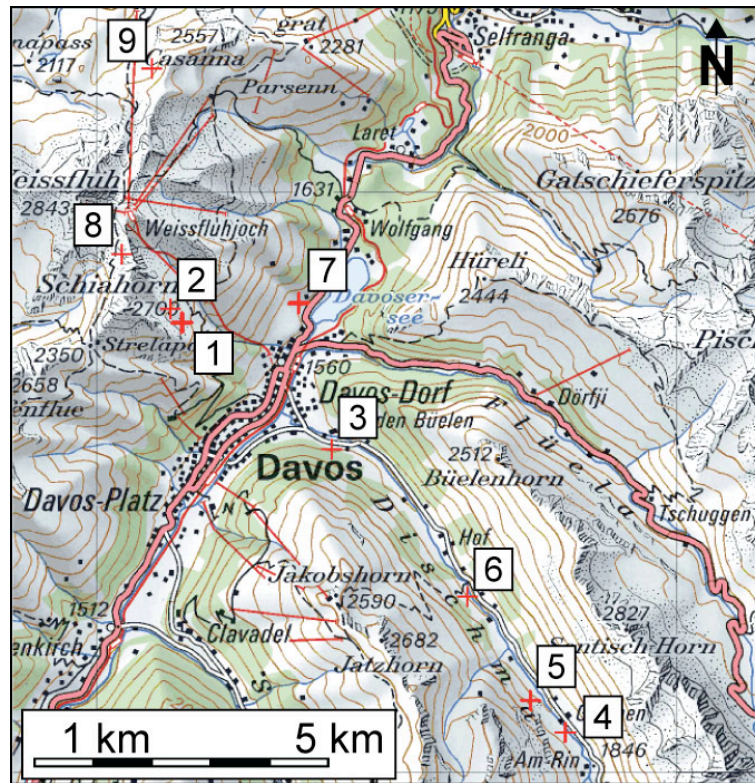


Abbildung 13 Räumliche Verteilung und Identifikationsnummern der beprobten Lawinenkegel. Reproduziert mit Bewilligung von swisstopo (BA091356)

Einige Oberflächen der untersuchten Lawinenkegel sind leicht überschneiten oder verregneten (vgl. Tabelle 6). Dadurch ändern sich die spektralen Charakteristiken der Lawinekegel. Diese Spektorradiometermessungen sind deshalb nicht uneingeschränkt repräsentativ für Spektren von frischen Lawinenkegeln. Allerdings unterliegt die Beschaffenheit von Schneeoberflächen in natura immer einem raschen Wandel. Für die Erkennung und Kartierung von Lawinenablagerungen mit Fernerkundungsdaten ist die Untersuchung von unterschiedlich beeinflussten Oberflächen sinnvoll. Aufgrund der beschränkten Anzahl verfügbarer Messungen ist die Aussagekraft der Untersuchungen in diesem Kapitel aber eingeschränkt.

Tabelle 6 Charakterisierung der untersuchten Lawinenablagerungen im Raum Davos

Lawine	Aufnahme	Eckdaten	Charakterisierung
1	26. April 2008 12:00	Länge der gesamten Lawine: ca. 250 m Exposition: NE Anriss: 36°-40° Höhe der Messung über Meer: 2200	Schneebrettlawine, leicht überschneit (ca. 5 cm) mit mächtigem Anriss (bis 2 m). Niedergang wahrscheinlich am 23. 04. 2008
2	26. April 2008 14:30	Länge der gesamten Lawine: ca. 100 m Exposition: E Anriss: 36°-40° Höhe der Messung über Meer: 2300	Lockerschneelawine mit punktförmigem Anriss, leicht überschneit. (ca. 5 cm). Niedergang wahrscheinlich am 24. 04. 2008
3	27. April 2008 10:00	Länge der gesamten Lawine: ca. 800 m Exposition: N Anriss: 36°-40° Höhe der Messung über Meer: 1580	Grosse Schneebrettlawine, nasser Schnee mit wenig Fremdmaterialanteil (Oberflächenlawine). Ablagerung wurde verregnet. Niedergang 23. 04. 2008
4	27. April 2008 12:15	Länge der gesamten Lawine: ca. 800 m Exposition: NE Anriss: 30°-35° Höhe der Messung über Meer: 1820	Grosse Schneebrettlawine, nasser Schnee mit wenig Fremdmaterialanteil (Oberflächenlawine). Ablagerung wurde verregnet. Niedergang wahrscheinlich 23. 04. 2008
5	27. April 2008 12:50	Länge der gesamten Lawine: ca. 500 m Exposition: NE Anriss: 30°-35° Höhe der Messung über Meer: 1860	Grosse Schneebrettlawine, nasser Schnee mit etwas Fremdmaterialanteil (Mischung zwischen Oberflächen- und Bodenlawine). Ablagerung wurde verregnet. Niedergang wahrscheinlich 23. 04. 2008
6	27. April 2008 14:25	Länge der gesamten Lawine: ca. 400 m Exposition: NE Anriss: > 40° Höhe der Messung über Meer: 1690	Grosse Schneebrettlawine, nasser Schnee mit viel Fremdmaterialanteil (Bodenlawine). Hat ein Waldstück zerstört und Schutt mitgerissen. Niedergang wahrscheinlich 23. 04. 2008
7	27. April 2008 15:45	Länge der gesamten Lawine: ca. 2000 m Exposition: SE Anriss: 30° - 35° Höhe der Messung über Meer: 1630	Sehr grosse Schneebrettlawine, nasser Schnee mit viel Fremdmaterialanteil (Mischung zwischen Oberflächen- und Bodenlawine). Teilgebiete des Kegels sind stark schuttbedeckt, andere schuttfrei. Verbreitet mannshohe Ablagerungselemente. Niedergang 22. 04. 2008
8	20. Jan. 2008 12:40	Länge der gesamten Lawine: ca. 100 m Exposition: SW Anriss: 36° - 40° Höhe der Messung über Meer: 2490	Kleine Schneebrettlawine, trockener Schnee ohne Fremdmaterialanteil (Oberflächenlawine). Kleine Ablagerungselemente, weder überschneit noch verregnet. Niedergang 19. 01. 2008
9	20. Jan 2008 14:30	Länge der gesamten Lawine: ca. 100 m Exposition: NW Anriss: 36° - 40° Höhe der Messung über Meer: 2240	Kleine Schneebrettlawine, trockener Schnee ohne Fremdmaterialanteil (Oberflächenlawine). Kleine Ablagerungselemente, weder überschneit noch verregnet. Niedergang wahrscheinlich 20. 01. 2008

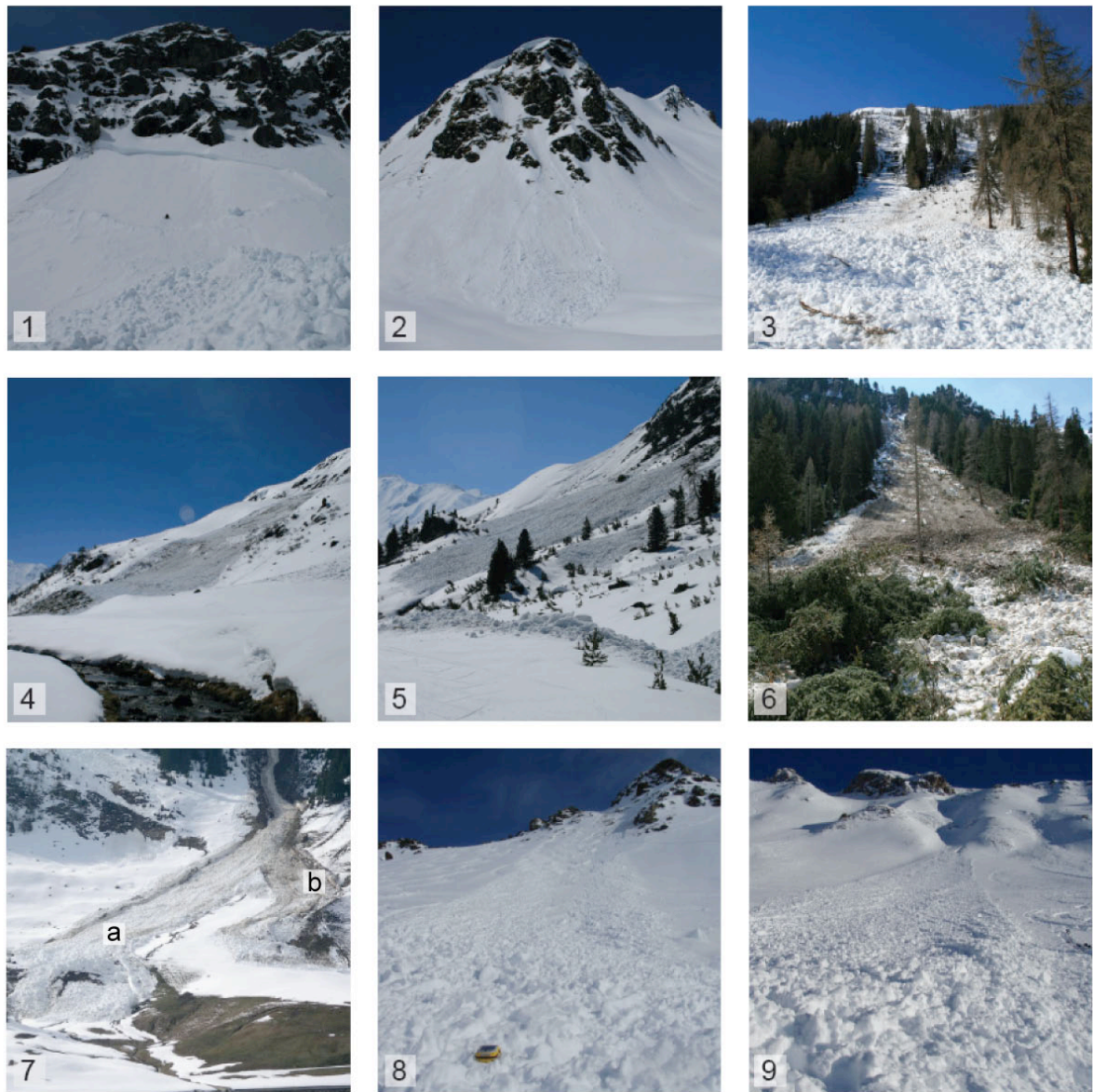


Abbildung 14 Fotografien der untersuchten Lawinenablagerungen (Fotografien A. Hüni, Y. Bühler, R. Meister)

Die untersuchten Lawinenablagerungen lassen sich aufgrund der Kegelcharakteristika in drei Gruppen einteilen:

- A Lawinenkegel kleinerer Niedergänge im Hochgebirge (über 2000 m ü. M.), welche nicht oder nur leicht überschneit wurden. Zu dieser Gruppe gehören die Kegel mit den Nummern 1, 2, 8 und 9.
- B Lawinenkegel von grossen Nassschneelawinen, welche den Talboden erreichen und wenige Tage vor der Messung verregnet wurden. Zu dieser Gruppe gehören die Lawinen mit den Nummern 3, 4, 5 und 7_a.
- C Lawinenkegel von Bodenlawinen, welche Schutt und Vegetation mitgerissen haben und deshalb eine verschmutzte Kegeloberfläche aufweisen. Zu dieser Gruppe gehört die Lawine Nummer 6 und der verschmutzte Kegelabschnitt der Lawine Nummer 7_b.

Abbildung 15 zeigt die Reflektanzspektren der untersuchten Lawinenkegel und der angrenzenden, ungestörten Schneedecke. Während die Spektren des ungestörten Schnees mit wenigen Ausnahmen vergleichsweise homogen sind, weisen die Spektren der Lawinenkegel eine grosse Streuung auf. Hauptgrund dafür ist die raue Oberfläche der Lawinenkegel, welche durch Schattenwurf und directionale Reflexionseffekte eine inhomogene Oberfläche erzeugt. Die Grundform der Spektren erscheint aber weitgehend einheitlich. Aufgrund der ausgeprägten vorwärts gerichteten Streueigenschaften (*forwardscattering*) des Schnees treten, abhängig von der Messgeometrie, im sichtbaren Bereich des elektromagnetischen Spektrums (VIS) auch Werte grösser als eins auf.

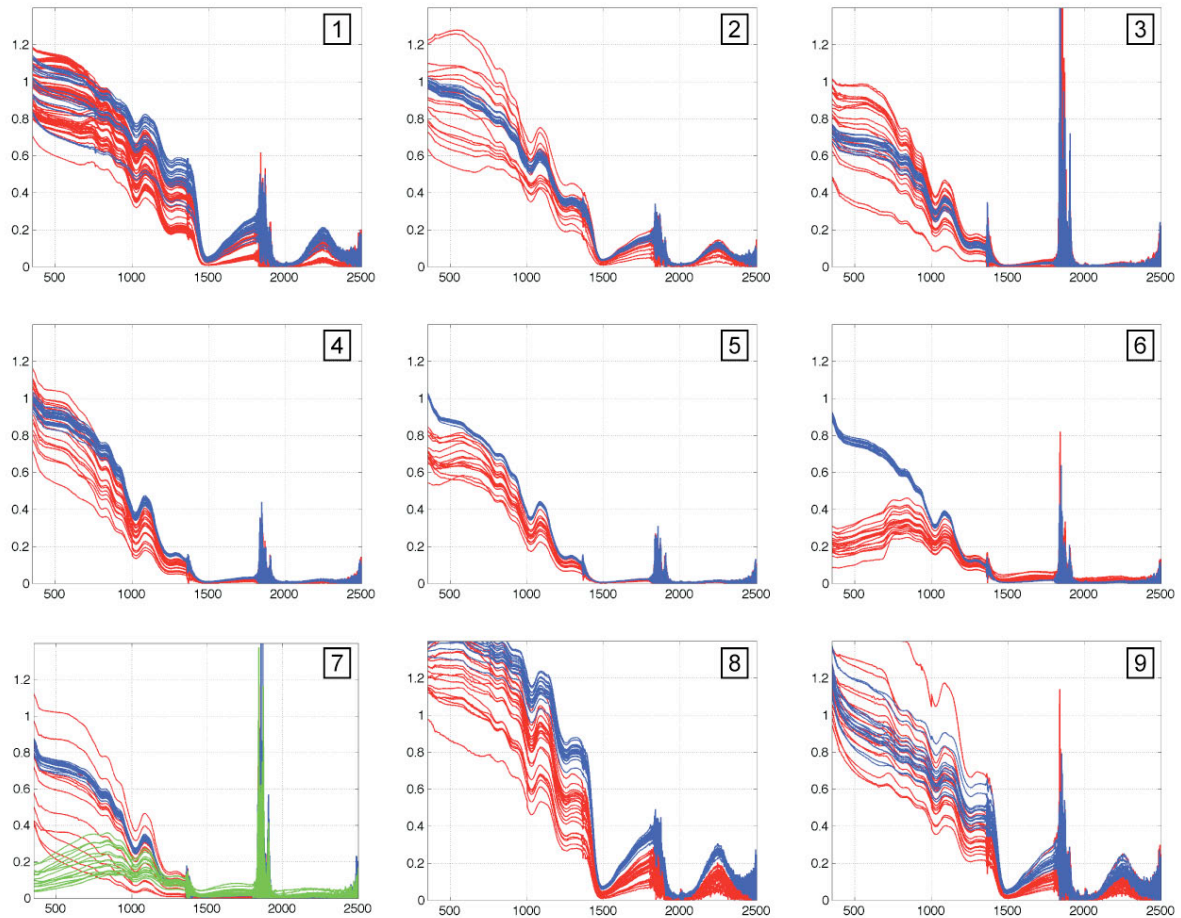


Abbildung 15 Reflektanzspektren der untersuchten Lawinenkegel (rot) und der angrenzenden, ungestörten Schneedecke (blau). Bei Lawine Nummer 7 sind zusätzlich in Grün Spektren des stark verschmutzten Teils des Lawinenkegels abgebildet (7_b vgl. Abbildung 14, S. 38). X-Achse = Wellenlänge, Y-Achse = Reflektanz

4.4. Methoden

Im Rahmen einer begleitenden Masterarbeit wurden explorativ verschiedene Methoden zur Analyse von Schnee- und Lawinenspektren getestet. Die für die Lawinenspektren am besten geeigneten Methoden wurden identifiziert und zur Trennung der Lawinenkegel von der ungestörten Schneedecke verwendet. Die in der Folge beschriebenen Methoden und Resultate basieren im Wesentlichen auf Treichler (2009).

4.4.1. Vorverarbeitung

In den Wasserabsorptionsbändern von 1350 bis 1400, 1800 bis 1950 und 2350 bis 2500 nm sind die spektralen Messwerte durch den Wasserdampf in der Atmosphäre gestört. Weil der absolute Wasserdampfgehalt der Luft mit zunehmender Höhe über Meer tendenziell abnimmt, sind die Messungen der höher gelegenen Stichproben in diesen Bereichen des Spektrums deutlich weniger stark gestört als die Messungen aus dem Tal (vgl. Abbildung 15).

Obwohl die Spektren jeweils über zehn Messungen gemittelt werden, treten durch Instrumentenrauschen verursachte Störungen auf. Mittels eines Savitzky-Golay Filters werden diese Rauscheffekte unter weitestgehender Beibehaltung der eigentlichen Form der Spektralkurve minimiert (Savitzky und Golay, 1964).

4.4.2. Statistische Indikatoren

Die Berechnung einfacher statistischer Masse wie Mittelwert und Varianz geben einen ersten, schnellen Überblick bezüglich der Qualität der Messdaten. Weil die vorliegenden Messreihen nicht normalverteilt sind, wird der nicht parameterische Wilcoxon Rangsummentest (Wilcoxon, 1945) zur Überprüfung der Unterscheidbarkeit von jeweiligen zwei Stichprobengruppen eingesetzt. Diese statistischen Indikatoren geben einen ersten Hinweis, ob eine Unterscheidung zwischen Lawinenkegeln und der ungestörten Schneedecke, basierend auf spektralen Informationen, möglich ist.

4.4.3. Hauptkomponententransformation

Bei einem *sampling intervall* von 1 nm zwischen 350 und 2500 nm enthält jedes Spektrum (Stichprobe) 2151 Messungen. Allerdings sind die Messpunkte meist stark korreliert. Insbesondere spektral benachbarte Werte enthalten wenig zusätzliche Information (vgl. Abbildung 16). Um die Redundanz einzuschränken, wird eine Hauptkomponententransformation (*principal component transformation* PCT) durchgeführt (Pearson, 1901). Das Hauptziel dieses Verfahrens ist die Reduktion der Dimensionen einer Messung. Dazu werden für die entsprechenden Messdimensionen, basierend auf der Kovarianzmatrix, standardisierte lineare Kombinationen mit der grösstmöglichen Varianz gesucht. Das ursprüngliche Koordinatensystem der Variablen (z.B. Spektralkanäle) wird dabei in ein neues Koordinatensystem transformiert, dessen neue Achsen (Hauptkomponenten) entlang der grössten Varianz des Datenraumes zu liegen kommen. Diese Hauptkomponenten sind unkorreliert und hierarchisch nach ihrem Informationsgehalt geordnet (Härdle und Simar, 2007). Die PCT wurde bereits mehrfach auf Bildspektrometriedaten angewendet (Abousleman et al., 1994; Bajcsy und Groves, 2004; Tsai et al., 2007). Die ersten zwei Hauptkomponenten enthalten den überwiegenden Teil der in allen Spektralkanälen enthaltenen Information zur Unterscheidbarkeit der Stichproben. Explorativ eingesetzt, gibt dieses Verfahren einen aussagekräftigen Hinweis darauf, ob Stichproben der Lawinenkegel anhand der erhobenen Spektren von Stichproben der ungestörten Schneedecke unterschieden werden können.

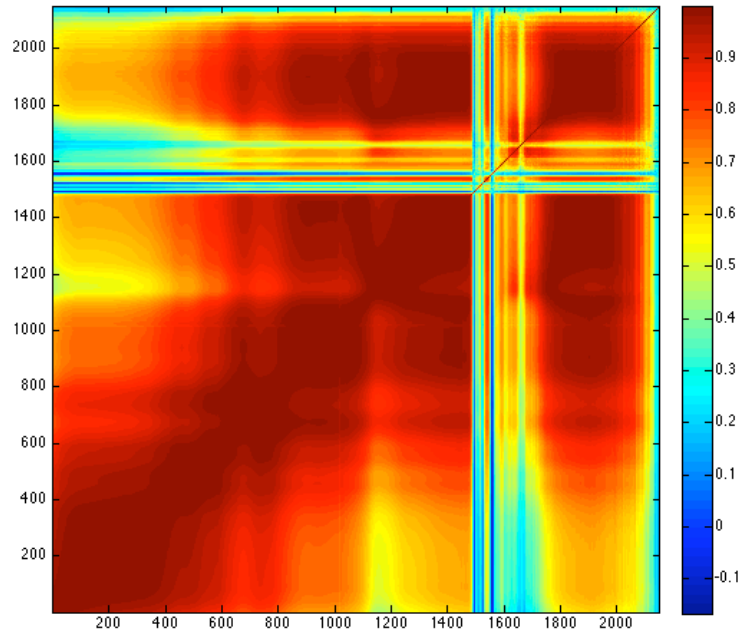


Abbildung 16 Korrelation aller Stichproben über die gemessenen 2151 Spektralkanäle

4.4.4. Continuum removal

Zur Identifikation von materialspezifischen Charakteristika (*features*) innerhalb einer Spektralkurve wurde u.a. das *continuum removal* Verfahren entwickelt (Clark und Roush, 1984). Features, welche sich durch materialspezifische Absorption der elektromagnetischen Strahlung in bestimmten Wellenlängenbereichen auszeichnen, werden Absorptionsfeatures genannt. Das gemessene Signal eines Spektrometers setzt sich aber in der Regel nicht aus der reflektierten Strahlung eines spezifischen Materials allein zusammen. Vielmehr ist es eine Überlagerung von Signalen verschiedener Materialien und zusätzlichen Beleuchtungseffekten im Sichtbarkeitsbereich (*field of view*) des Sensors. Mittels einer mathematischen Funktion wird versucht, die Effekte der überlagernden Prozesse nachzubilden. Die gemessenen Spektralwerte werden anhand einer ausgewählten mathematischen Funktion (Hüllkurve) normalisiert (vgl. Formel 2) (Clark und Roush, 1984). Materialspezifische Absorptionsfeatures werden dadurch besser erkennbar und eine statistische Auswertung wird erleichtert. Dieses Verfahren wurde ursprünglich für geologische Anwendungen entwickelt und erfolgreich eingesetzt (Clark und Roush, 1984; Galvao et al., 2008). Die Methode wurde danach auch verbreitet für die Auswertung von Pflanzenspektren verwendet (Curran et al., 2001; Huber et al., 2008; Kokaly und Clark, 1999; Kokaly et al., 2003).

$$C = \frac{R_c - R_s}{R_c} \quad (2)$$

wobei:

R_s = Reflektanzwert des Ausgangsspektrums

R_c = Korrespondierender Reflektanzwert der Kontinuum – Funktion

Weil die Varianz der Reflektanzwerte in den Lawinenspektren gross ist, macht ein direkter Vergleich der absoluten Werte wenig Sinn. Das *continuum removal* normalisiert die Reflektanzwerte und lässt einen sinnvollen Vergleich der Absorptionsfeatures zu. Wasser in allen drei Aggregatzuständen weist bei einer Wellenlänge von ca. einem Mikrometer ein Absorptionsfeature auf. Das lokale Minimum von Eis und Schnee liegt verglichen mit dem Absorptionsfeature von flüssigem Wasser leicht verschoben in Richtung der grösseren Wellenlänge (Dozier und Painter, 2004; Wiscombe und Warren, 1980). Der Nahinfrarotbereich des elektromagnetischen Spektrums reagiert besonders sensitiv auf die mittlere Korngrösse der Schneeoberfläche (Warren, 1982) und hat deshalb Potential zur Unterscheidung von Lawinenablagerungen von der ungestörten Schneedecke.

Die Analyse aller lokalen Maxima und Minima innerhalb der Schnee- und Lawinenkegelspektren weist auf drei interessante Absorptionsfeatures hin. Diese Features wurden mittels konvexer Hüllkurven normalisiert und bei den lokalen Maxima gezwungen, die Hüllkurve zu berühren. Die Tiefe d und Fläche a der Absorptionsfeatures wurden auf ihr Trennbarkeitspotential für die Unterscheidung zwischen Lawinenkegel und der ungestörten Schneedecke untersucht (Abbildung 17).

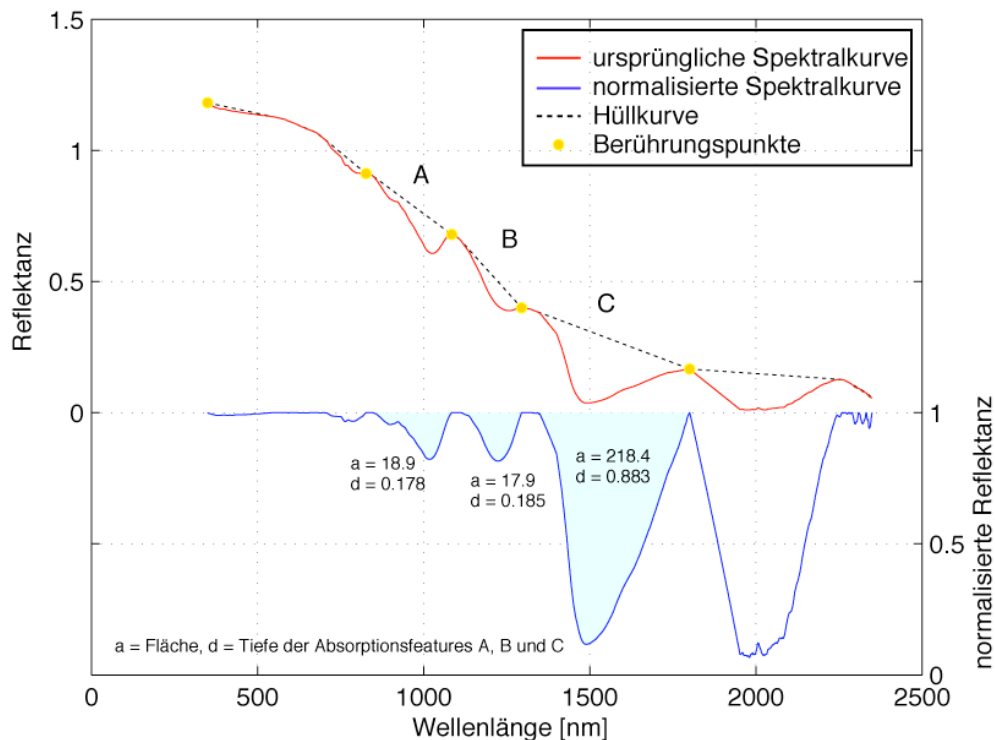


Abbildung 17 *Continuum removal* mit erzwungenen Berührungspunkten. Die interessanten Absorptionsfeatures liegen bei A) 1020 nm, B) 1220 nm, C) 1500 nm. Das Absorptionsfeature bei ca. 2000 nm wurde aufgrund der atmosphärischen Störungen nicht berücksichtigt (Treichler, 2009).

Um das Trennbarkeitspotential dieser Absorptionsfeatures zwischen den Lawinenablagerungen und der ungestörten Schneedecke zu quantifizieren, werden die

Jeffries-Matusita (JM) Distanz zwischen den Stichproben berechnet. Bei normalverteilten Klassen entspricht die JM-Distanz der Bhattacharyya-Distanz (BH) (Bhattacharyya, 1943; Richards, 1993). Je grösser die JM Distanzen sind, desto besser lassen sich die untersuchten Klassen voneinander trennen. Mit jeweils der Hälfte der Stichproben als Trainingswerte wird eine Diskriminanzanalyse der Fläche und Tiefe der Absorptionsfeatures mit a) linearen und b) quadratischen Entscheidungsgrenzen durchgeführt. Diese Entscheidungsgrenzen werden danach auf die andere Hälfte der Stichproben angewendet, um die Stichproben zu klassieren. Dieses Vorgehen wird einerseits auf alle Testgebiete einzeln sowie auf alle Testgebiete zusammen angewendet.

4.5. Resultate und Diskussion

4.5.1. Statistische Indikatoren

Für alle erhobenen Spektren werden der Mittelwert und die Varianz berechnet (Abbildung 18). Diese einfach zu berechnenden Indikatoren lassen erste Schlüsse zu:

- Die mittlere Reflektanz der Lawinenoberfläche ist meist tiefer als diejenige des ungestörten Schnees. Ausnahmen bilden die Lawinen 3 und 9, bei denen die mittlere Reflektanz der Lawinenkegel im sichtbaren (VIS) und nahinfraroten (NIR) Bereich des elektromagnetischen Spektrums geringfügig höher liegt. Die plausibelste Erklärung für diese Beobachtung ist der unterschiedliche Schattenwurf auf der rauen Oberfläche von Lawinenkegeln.
- Die Form der Spektralkurven aus den gemittelten Reflektanzwerten von Lawinenkegeln und der angrenzenden, ungestörten Schneedecke sind sich sehr ähnlich. Die Spektren beider Objektgruppen zeigen hohe Reflektanzwerte im VIS und NIR Bereich des elektromagnetischen Spektrums und absorbieren den Grossteil der einfallenden Strahlung im Bereich des kurzwelligen Infrarots (SWIR). Eine deutliche Abweichung von dieser Form zeigen die Spektren von verschmutzten Lawinenkegeln (Lawinen Nummer 6 und 7). Bei diesen Spektren wird aufgrund des hohen Fremdmaterialanteils bereits im VIS und NIR ein Grossteil der einfallenden Strahlung absorbiert.
- Die Spektren, welche im Tal auf einer Höhe von 1500 bis 1800 m ü. M gemessen wurden (Nummern 3 bis 7), zeigen im Bereich von 1500 bis 2500 nm ein deutlich anderes Verhalten als die Spektren aus dem Hochgebirge (Nummern 1, 2, 8 und 9). Das Signal ist bei der ersten Gruppe sehr schwach. Eine statistisch aussagekräftige Analyse im Bereich von 1500 bis 2500 nm ist deshalb schwieriger als im VIS und NIR Bereich.
- Die Varianz der Spektren von Lawinenkegeln ist deutlich höher als die Varianz der ungestörten Schneespektren. Während die ungestörte Schneedecke vergleichsweise homogene Messungen ermöglicht, führen Schatten-

wurf und Neigungseffekte auf der rauen Oberfläche der Lawinenkegel zu ausgesprochen inhomogenen Messungen.

- Die Varianz der Lawinenkegel nimmt in der Regel mit zunehmender Wellenlänge ab. Die Varianz der ungestörten Schneeoberfläche (mit Ausnahme der Lawinen Nummer 1 und 9) ist dagegen in allen Wellenlängenbereichen tief.

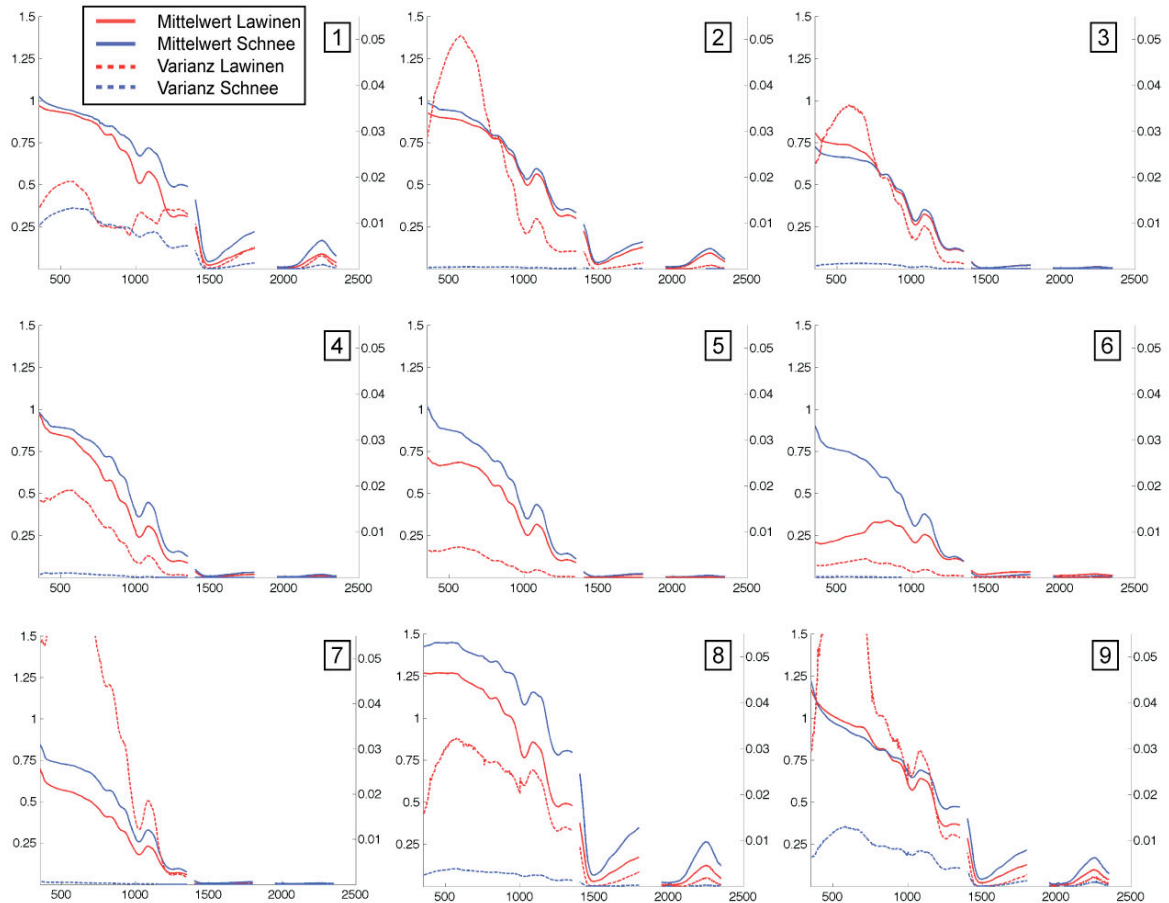


Abbildung 18 Mittelwert und Varianz der Spektren von Lawinenkegeln und dem angrenzenden, ungestörten Schnee. Bei Lawine Nummer 7 sind in Grün auch die Werte für die Spektren des verschmutzten Teils der Lawine abgebildet (7_b). X-Achse = Wellenlänge, Y-Achse links = Reflektanz, Y-Achse rechts = Varianz

Die deutlichen Unterschiede zwischen den einzelnen Messorten, die sich in der Form der Spektralkurven im VIS und NIR Bereich zeigen, weisen auf grosse Beleuchtungsunterschiede hin. Diese Unterschiede werden durch den unterschiedlichen Sonnenstand (Azimuth- und Zenithwinkel) zum Aufnahmezeitpunkt sowie die unterschiedliche Hangneigung und Exposition der Untersuchungsobjekte verursacht. Die Form der Lawinenspektren und der Spektren des angrenzenden ungestörten Schnees ist aber sehr ähnlich. Diese Beobachtung legt die Vermutung nahe, dass ein direkter Vergleich aller Spektren wegen den unterschiedlichen Beleuchtungsbedingungen schwierig ist. Die Spektren an einem einzelnen Messort weisen aber vergleichbare Beleuchtungsbedingungen auf, deshalb können Rückschlüsse auf die spezifischen Eigenschaften der Lawinenkegel und der angrenzenden, ungestörten Schneedecke gezogen werden.

4.5.2. Hauptkomponententransformation

Abbildung 19 zeigt das Ergebnis der Hauptkomponententransformation für alle Stichproben, sowohl der Lawinenkegel wie auch der ungestörten Schneedecke. Die Stichproben der ungestörten Schneedecke bilden deutlich kompaktere Punktwolken als die Stichproben der Lawinenkegel. Dies ist auf die vergleichsweise geringe Streuung der Messwerte zurückzuführen. Die Mehrheit der Stichproben lässt sich anhand der ersten beiden Hauptkomponenten aber nicht eindeutig einer Gruppe zuweisen. Insbesondere erreicht die Trennung zwischen Lawinenkegeln und der ungestörten Schneedecke keine befriedigende Qualität. Deshalb gibt es vermutlich keine allgemeingültige, substantielle spektrale Unterschiede zwischen Lawinenkegeln und der ungestörten Schneedecke. Aufgrund der unterschiedlichen Beleuchtungsbedingungen, welche das Messsignal überlagern, kann eine solche Vermutung nicht abschliessend bestätigt werden. Nur vereinzelt lassen sich Gruppen trennen. Insbesondere die verschmutzten Lawinenkegel Nummer 6 und 7_b bilden eine Punktwolke in der linken unteren Ecke, welche sich mit keiner Stichprobe des ungestörten Schnees oder eines anderen Lawinenkegels überschneidet. Die in Kapitel 4.3 definierten Kegeltypen (A Kegel im Hochgebirge, B verregnete Kegel von Tallawinen und C verschmutzte Kegel von Bodenlawinen) bilden in den ersten zwei Hauptkomponenten identifizierbare Wolken.

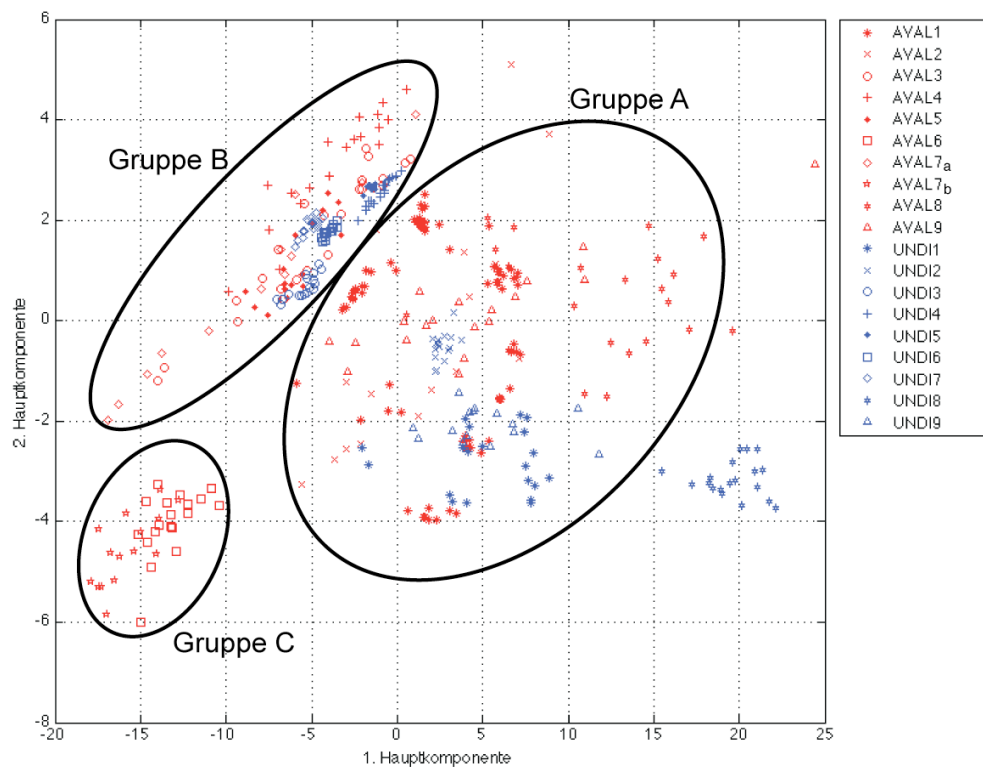


Abbildung 19 Ergebnis der Hauptkomponententransformation für die Stichproben der Lawinenkegel (rot, AVAL) und der ungestörten Schneedecke (blau, UNDI). Die in Kapitel 4.3 definierten Lawinentypen sind klar gruppiert.

Welche Lawinenkegel sich besonders gut oder schlecht von der angrenzenden, ungestörten Schneedecke unterscheiden lassen, wird mittels einer paarweisen

Hauptkomponentenanalyse für alle der neun getesteten Lawinen untersucht (Abbildung 20). Bei diesen Messungen können die Beleuchtungsverhältnisse und der Zustand der Atmosphäre als stabil betrachtet werden, da der Kegel und die ungestörte Schneedecke innerhalb weniger Minuten gemessen wurden und die Exposition und Hangneigung der Stichproben vergleichbar waren. Diese Untersuchung zeigt, dass nicht alle Lawinenkegel aufgrund der ersten beiden Hauptkomponenten eindeutig von der angrenzenden, ungestörten Schneedecke unterschieden werden können. Die Kegel mit einem hohen Anteil an Schutt (Nummer 6 und 7_b) sind sehr gut von der angrenzenden, ungestörten Schneedecke unterscheidbar. Auch die Kegel der Lawinen Nummer 3, 4, 5, 8 und 9 zeigen innerhalb der ersten zwei Hauptkomponenten eine gute Trennbarkeit der beiden Klassen. Die Kegel der Lawinen Nummer 1, 2 und 7_a (unverschmutzter Teil) lassen sich aber nicht eindeutig von der angrenzenden Schneedecke unterscheiden.

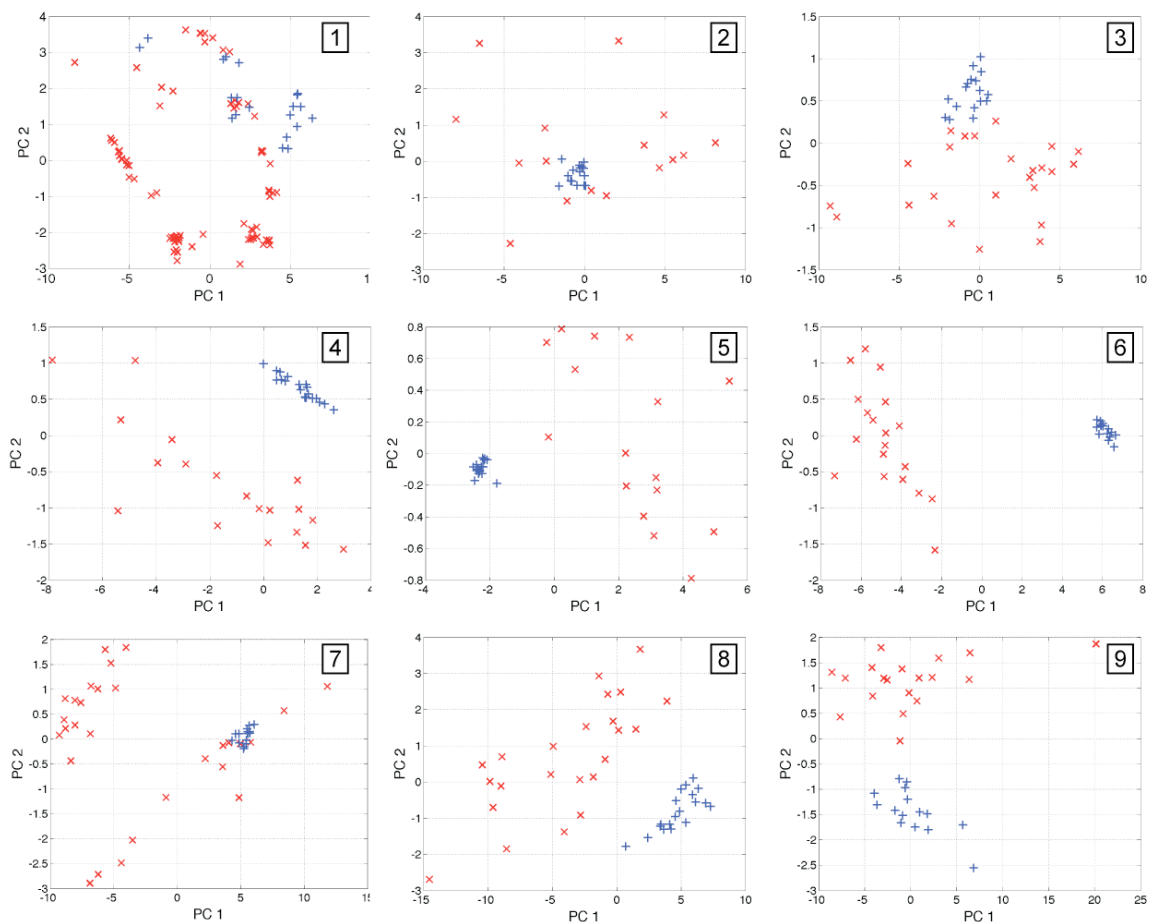


Abbildung 20 Trennbarkeit der Lawinenkegel (rot) von der angrenzenden ungestörten Schneedecke (blau) anhand der ersten beiden Hauptkomponenten für die neun getesteten Lawinen

4.5.3. Continuum removal

Die Normalisierung durch das *continuum removal* macht Unterschiede zwischen den Spektren der Lawinenkegel und der ungestörten Schneedecke sichtbar, welche anhand der ursprünglichen Spektren kaum identifizierbar sind (Abbildung 21). Signifikante Unterschiede in der Fläche und Tiefe werden bei allen drei untersuchten Absorptionsfeatures beobachtet. Für die Stichproben der Lawinen 1, 6, 7_b 8

und 9 zeigt der Kruskal-Wallis Varianztest signifikante Unterschiede (vgl. Tabelle 7). Für die Tiefe des Absorptionsfeatures bei 1500 nm zeigt der Test ebenfalls signifikante Unterschiede bei allen untersuchten Lawinenkegeln. Die Tiefe der Absorptionsfeatures bei 1500 nm ist bei den Spektren der Lawinenablagerungen tiefer als bei einer ungestörten Schneedecke. Eine Ausnahme bilden die Spektren der verschmutzten Lawinenkegel (6, 7_b) wo die Tiefe dieses Features deutlich niedriger ist.

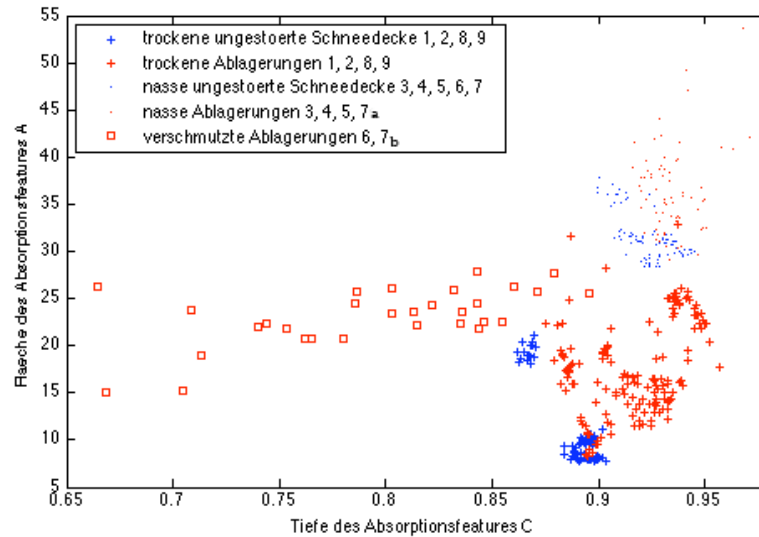


Abbildung 21 Stichproben der verschiedenen Lawinentypen und der ungestörten Schneedecke abhängig von den am besten zur Trennung geeigneten Absorptionsfeatures: Fläche des Absorptionsfeatures A (1020 nm) und Tiefe des Features C (1500 nm) (Treichler, 2009)

Tabelle 7 Ergebnisse des Kruskal-Wallis Varianztests für die Unterschiede der Mediane der Spektren von Lawinenablagerungen und der ungestörten Schneedecke (a = Fläche, d = Tiefe der untersuchten Features). Die Zahlen zeigen die Wahrscheinlichkeit in Prozent für die Gleichheit der zwei Gruppen. Je kleiner der Wert desto besser die Trennbarkeit. Werte kleiner als 0.0005% sind als Null dargestellt (Treichler et al., 2009)

Lawine	Absorptionsfeature bei Wellenlänge					
	1020 nm		1220 nm		1500 nm	
	a	d	a	d	a	d
1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.015
2	59.900	76.300	70.600	47.400	0.001	0.000
3	0.000	0.094	5.670	4.430	0.752	0.000
4	0.000	0.000	0.055	0.000	44.800	0.003
5	0.003	0.042	23.500	47.100	1.430	0.690
6	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000
7 _a	30.900	65.800	96.500	79.100	42.500	0.001
7 _b	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
8	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
9	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
all	6.640	4.870	58.600	87.700	13.200	0.000

Die JM und BH Distanzen zwischen den Spektren der Lawinenablagerungen und der angrenzenden, ungestörten Schneedecke, gemessen am selben Ort, ist bei allen untersuchten Lawinen sehr gross. Bei den Lawinen 3, 6, 7_b, 8 und 9 wird gar der Maximalwert von 2 erreicht, was auf eine optimale Trennbarkeit hinweist. Der Vergleich aller Testgebiete, unabhängig vom Messort, ergibt aber eine deutlich schlechtere Trennbarkeit. Dies deutet auf den beträchtlichen Einfluss der unterschiedlichen Messbedingungen auf das Resultat hin. Dennoch ergibt die Klassifikation aller Spektren anhand der Tiefe und Fläche der drei Absorptionsfeatures eine Gesamtgenauigkeit (*overall accuracy*) von 80 bzw. 86 % und Kappa Koeffizienten von 0.59 bzw. 0.72 für lineare bzw. quadratische Klassifikatoren (Tabelle 8).

Tabelle 8 Trennbarkeitsanalyse anhand von Absorptionsfeatures in Spektren von Lawinenablagerungen und benachbarten, ungestörten Schneedecken (Treichler et al., 2009)

Lawine	JM	BH	Linear		Quadratisch	
			OA%	Kappa	OA%	Kappa
2	1.98	4.71	94	0.88	100	1.00
3	2.00	8.31	95	0.90	75	0.42
4	1.99	4.93	94	0.90	94	0.90
5	1.99	5.62	100	1.00	87	0.75
6	2.00	9.37	100	1.00	100	1.00
7 _a	1.94	3.59	90	0.81	100	1.00
7 _b	2.00	11.11	100	1.00	100	1.00
8	2.00	6.10	100	1.00	100	1.00
9	2.00	15.60	100	1.00	100	1.00
all	1.51	1.40	80	0.59	86	0.72

4.6. Schlussfolgerungen

Die gemessenen Spektren der Ablagerungen aller untersuchten Lawinen weisen eine hohe Variabilität auf, welche hauptsächlich durch BRDF-Effekte an der rauen Oberfläche verursacht wird. Die hohe Variabilität verunmöglicht eine eindeutige Unterscheidung von Lawinenkegeln und der ungestörten Schneedecke alleine anhand des Spektralverhaltens. Auch die Lawinenkegel unter sich lassen sich anhand von Spektralinformationen nicht eindeutig typisieren, was auf den bedeutenden Einfluss der unterschiedlichen Messbedingungen zurückzuführen ist. Deshalb reichen einfache statistische Masse wie Mittelwert und Standardabweichung nicht aus, um die spektralen Charakteristika von Lawinenablagerungen befriedigend zu beschreiben. Die ersten beiden Komponenten einer Hauptkomponententransformation (PCT) lassen aber eine Einteilung der Lawinenkegel in drei Hauptgruppen zu: verschmutzte Lawinenkegel mit deutlich reduzierter Reflektanz im sichtbaren Bereich des elektromagnetischen Spektrums (C), Kegel von Nassschneelawinen mit einer Reflektanz von annähernd Null im Wellenlängenbereich von 1400 bis 2500 nm (B) und frische oder leicht überschneite Kegel mit geringerer Reflektanz im NIR als der angrenzende, ungestörte Schnee (A) (vgl. Abbildung 19). Eine eindeutig spektrale Trennbarkeit zwischen den Lawinenablagerungen und den Stichproben der ungestörten Schneedecke ist aber nicht möglich. Dies ist primär auf die unterschiedlichen Charakteristiken der untersuchten Lawinenkegeltypen sowie auf die unterschiedlichen Beleuchtungsbedingungen

(v.a. Sonnenstand, Exposition und Hangneigung) an den einzelnen Messtandorten zurückzuführen.

Die statistische Analyse der durch ein *continuum removal* normalisierten Spektren deutet aber darauf hin, dass signifikante Unterschiede in der Tiefe und Fläche von Absorptionsfeatures bei 1020, 1220 und 1500 nm bestehen. Vor allem das Feature bei 1500 nm zeigt statistisch signifikante Unterschiede zwischen den Ablagerungen und der ungestörten Schneedecke an allen Messtandorten. Die Tiefe dieses Features ist bei den Lawinenkegeln deutlich ausgeprägter als bei den Spektren von ungestörten Schneedecken. Ausnahmen bilden die verschmutzten Kegel, bei denen die Tiefe dieses Features deutlich geringer ist. Dieses Unterscheidungsmerkmal bleibt signifikant selbst wenn alle Spektren von allen Messtandorten einbezogen werden. Eine Klassifikation der Stichproben anhand der Tiefe und Fläche der drei beschriebenen Absorptionsfeatures resultiert unter Einbezug aller Spektren in einer Gesamtgenauigkeit von 86%.

Die Hypothese, wie in Kapitel 4.2 formuliert, wird durch diese Untersuchungen bestätigt. Die Untersuchung deutet darauf hin, dass messbare spektrale Unterschiede zwischen Lawinenkegeln und der ungestörten Schneedecke mit vergleichbarer Exposition und Hangneigung existieren. Dies gilt auch für die Unterscheidung zwischen den verschiedenen Typen (vgl. S. 38) von Lawinenkegeln. Allerdings sind diese Unterschiede oft minimal und schwierig zu erfassen. Zudem werden die Messungen durch variable Messbedingungen stark beeinflusst. Eine Erfassung solcher Unterschiede mit flugzeug- oder satellitengestützten Fernerkundungssensoren ist nach Einschätzung des Autors kaum möglich. Um diese Aussagen zu bestätigen, müssen weitere spektrale Messungen von Lawinenablagerungen unterschiedlicher Typen wenn möglich unter konstanten Laborbedingungen erhoben und ausgewertet werden. Die *continuum removal* Methode sollte auf flugzeuggestützte (z. B. APEX) und satellitengestützte (z.B. PROBA) Bildspektrometerdaten angewendet werden, um ihr Potential zu evaluieren.

Kapitel 5

Charakterisierung der direktionalen Eigenschaften von Lawinenablagerungen

5.1. Einleitung

Wie das einfallende Sonnenlicht an einer Oberfläche reflektiert wird ist hauptsächlich von den Charakteristika des beleuchteten Objektes abhängig. Glatte Oberflächen, wie Gewässer bei Windstille oder Fensterscheiben, reflektieren die einfallende Strahlung wie ein Spiegel hauptsächlich in eine Richtung (spekulare Reflexion). Raue Oberflächen, wie das Kronendach von Wäldern, reflektieren dagegen die einfallende Strahlung nicht primär in eine Richtung, es treten Volumestreue und Schattenwurf auf. Kein natürliches Objekt an der Erdoberfläche reflektiert die einfallende Strahlung in alle Richtungen gleich (isotrope Reflexion), sondern unterschiedlich stark (anisotrope Reflexion). Die rein spekulare sowie die rein diffuse Reflexion existieren nur in der Theorie. Natürliche Objekte zeigen stets eine Mischform dieser beiden Reflexionstypen. Dieses anisotrope Reflexionsverhalten ist eine fundamentale Eigenschaft von natürlichen Materialien. Für einen Bildausschnitt ändert sich die Intensität der vom Sensor gemessenen, von einem Objekt reflektierten Strahlung mit verändertem Beleuchtungs- und Beobachtungswinkel. Diese Information kann für die Erkennung und Kartierung von Objekten mit Fernerkundungsdaten, aufgenommen aus unterschiedlichen Blickwinkeln, verwendet werden (Lucht, 2004).

Lawinenablagerungen weisen verglichen mit der ungestörten Schneedecke eine raue, unregelmässige Oberflächenstruktur auf. Dadurch entsteht ein Mosaik aus stark reflektierenden und beschatteten Flächen, welches von Auge gut erkennbar ist (vgl. Abbildung 22). Der Schattenwurf auf einer rauen Oberfläche ist abhängig vom Einstrahlungswinkel und der Dimension der Ablagerungselemente sowie der diffusen Illumination, welche durch Nachbarschaftseffekte noch verstärkt werden kann. Welcher Anteil der beschatteten Fläche mit einem Sensor gemessen wird, hängt von dessen Beobachtungswinkel ab. Sind bei konstanter Beleuchtungssituation Aufnahmen derselben Oberfläche aus unterschiedlichen Blickwinkeln verfügbar, so können diese Informationen zur Charakterisierung der Oberflächenrauigkeit verwendet werden. Ob diese Informationen für die Erkennung und Kartierung von Lawinenablagerungen eingesetzt werden können, wird in diesem Kapitel untersucht.



Abbildung 22 An der Oberfläche eines Lawinenkegels treten aufgrund der rauen Topographie auf kleinem Raum direktionale Effekte wie Schattenwurf und spekulare Reflexion auf (Fotografien A. Hüni, Y. Bühler)

5.2. Grundlagen

5.2.1. Bi-directional reflectance distribution function BRDF

Die an der Erdoberfläche auftreffende Sonnenstrahlung wird durch die Objekte am Boden verändert. Dabei wird die einfallende Strahlung aufgeteilt in einen Anteil reflektierte Strahlung, einen Anteil absorbierte Strahlung und einen Anteil transmittierte Strahlung. Die Intensität der vom Sensor gemessenen, an der Erdoberfläche reflektierten Strahlung, ist abgesehen vom Zustand der Atmosphäre, abhängig von der Einstrahlungsintensität, dem Einstrahlungswinkel, dem Beobachtungswinkel und den strukturellen und optischen Charakteristika der Materialien (Lillesand und Kiefer, 2000). Das Phänomen, dass bei unterschiedlichen Blickwinkeln verschiedene Reflexionsintensitäten gemessen werden, wird in der Wissenschaft als Funktion der bi-direktionalen Verteilung der Reflexion (*bi-directional reflectance distribution function* BRDF) beschrieben. Die BRDF beschreibt die von einem Objekt reflektierte Strahlung als eine Funktion der unabhängigen Variablen: Wellenlänge, Einstrahlungsazimut und Zenitwinkel sowie Beobachtungsazimut und Zenitwinkel (Nicodemus et al., 1977). Das durch die BRDF beschriebene Konzept der direktionalen, anisotropen Reflexion gilt für alle natürlichen Materialien und ist deshalb von grundlegender Bedeutung für die Beobachtung der Erdoberfläche (Lucht, 2004). Für den hypothetischen Fall einer rein bi-direktionalen Reflexion wird die BRDF mit Formel (3) beschrieben (Briottet, 2004). Die Winkel der Aufnahmegeometrie sind in Abbildung 23 dargestellt.

$$f(\lambda, \theta_s, \phi_s, \theta_v, \phi_v) = \frac{L_v(\lambda, \theta_s, \phi_s, \theta_v, \phi_v)}{E(\lambda, \theta_s, \phi_s)} \quad (3)$$

Wobei:

E	=	Einfallende spektrale Energie ($W m^{-2} \mu m^{-1}$)
L_v	=	Reflektierte spektrale Energie unter dem Beobachtungswinkel v ($W m^{-2} sr^{-1} \mu m^{-1}$)
θ_s	=	Zenitwinkel der Sonne
θ_v	=	Zenitwinkel der Beobachtung
Φ_s	=	Azimuthwinkel der Sonne
Φ_v	=	Azimuthwinkel der Beobachtung
λ	=	Wellenlänge

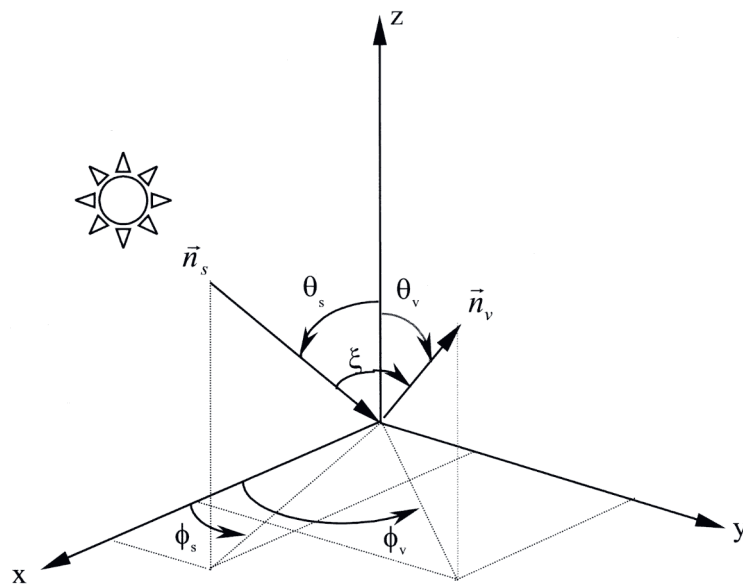


Abbildung 23 Einstrahlungs- und Beobachtungswinkel welche die BRDF bestimmen (Briottet, 2004)

Weil aber weder die Einstrahlung noch die gemessene reflektierte Strahlung rein direktional sind, kann die BRDF nicht direkt gemessen werden. Im Labor wird deshalb die bi-konische Aufnahmegeometrie zur Annäherung der BRDF verwendet (Schaepman-Strub et al., 2006).

Die Bedeutung von direktionalen Effekten für die Intensität der von einem Sensor gemessenen, reflektierten Strahlung wird am Beispiel von Wäldern deutlich. Ein Nadelwaldgebiet, betrachtet aus der Nadir-Blickrichtung, besteht aus einem Muster aus Baumkronen, Schatten, sichtbaren Waldboden und Unterwuchs. Betrachtet man denselben Waldabschnitt aus grösserem Zenitwinkel mit der Sonne im Rücken, wirkt der Ausschnitt sehr viel heller. Schatten und Waldboden sind nur vereinzelt sichtbar (*gap*-Effekt). Mit Blickrichtung zur Sonne rücken hauptsächlich die Eigenschatten der Bäume ins Blickfeld (Abbildung 24). Dies führt aus dem Blickwinkel des Betrachters zu einer deutlich geringeren Intensität der reflektierten Strahlung (*backshadow*-Effekt) (Sandmeier, 2004). Diese Effekte sind auf der Ebene

Betrachter – Objekt – Sensor, der Sonnenhauptebene (*solar principal plane*), am stärksten ausgeprägt (Peltoniemi et al., 2005). Schattenwurf, ausgelöst durch die dreidimensionale Struktur einer rauen Oberfläche ist der dominierende direktionale Effekt. Er führt zu deutlich unterschiedlichen Intensitäten der reflektierten Strahlung in Bilddaten, aufgenommen aus unterschiedlichen Blickrichtungen (Lucht, 2004). Vergleichbare Effekte treten auch bei Lawinenkegeln auf.

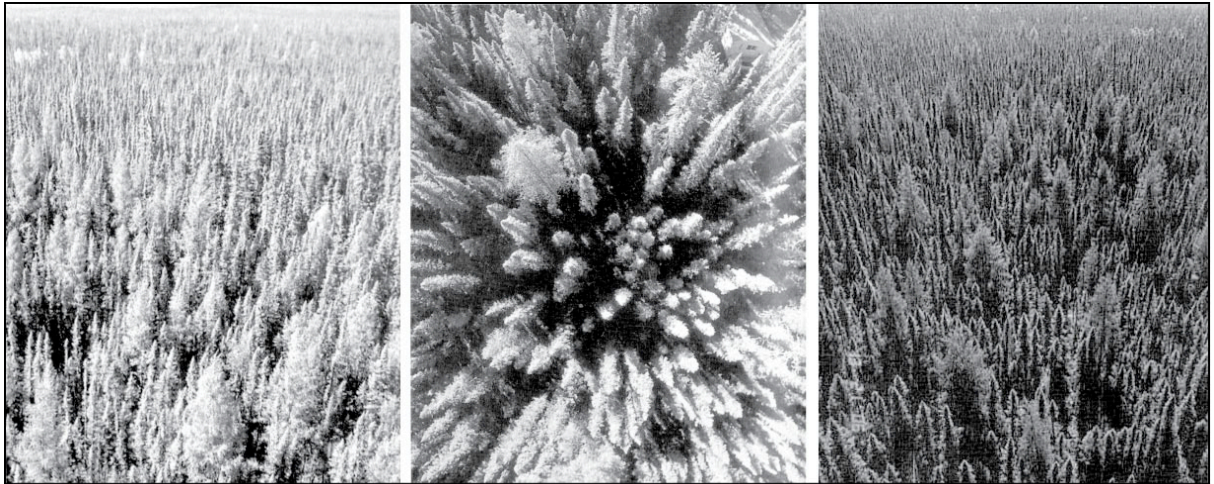


Abbildung 24 Nadelwald betrachtet aus unterschiedlichen Blickrichtungen. Links: Sonne im Rücken, Mitte: Nadir, Rechts: gegen die Sonne (Sandmeier, 2004).

Schaepman (2007) gibt einen kurzen Überblick über die Geschichte der BRDF-Forschung im Allgemeinen und die direktionale Forschung mit Fernerkundungsdaten im Speziellen. Bereits im 17. Jahrhundert hat sich Leonardo da Vinci in seinen Notizbüchern mit dem Schattenwurf von Objekten und dessen Einfluss auf die reflektierte Strahlung beschäftigt (Richter, 1970). Versuche, diese Beobachtungen zu messen, wurden aber erst im 19. Jahrhundert unternommen. Nicodemus (Nicodemus, 1970; Nicodemus et al., 1977) hat die Nomenklatur der Begriffe standardisiert und den Begriff BRDF eingeführt. In den Neunzigerjahren starteten die ersten Satelliten mit Instrumenten, welche Messungen der Erdoberfläche aus mehreren Blickwinkeln ermöglichten. Heute befasst sich eine wachsende Anzahl von Wissenschaftlern mit Fragen rund um die BRDF. Verschiedene satellitengestützte Sensoren mit unterschiedlicher räumlicher Auflösung, welche innerhalb von kurzer Zeit Daten aus unterschiedlichen Blickwinkeln aufnehmen können, liefern Daten für diesen wachsenden Forschungszweig (z.B. CHRIS, MISR, POLDER) (Kramer, 2002).

5.2.2. Rückschlüsse auf die Oberflächenrauigkeit von schneebedeckten Oberflächen

Die Rauigkeit einer Oberfläche kann als Quadratwurzel der mittleren Abweichung der realen Oberfläche von einer über die gesamte Fläche gemittelten Ebene definiert werden (Formel 4) (Nolin und Payne, 2007).

$$\xi = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (z_e - z_s)^2} \quad (4)$$

Wobei:

n	=	Messpunkte
z_e	=	Höhe der gemittelten Ebene
z_s	=	Höhe der realen Oberfläche

Die Oberflächenrauigkeit beeinflusst die BRDF auf zwei Arten. Einerseits durch den direkten Schattenwurf, hervorgerufen durch die dreidimensionale Struktur der rauen Oberfläche (*shadowing*), und andererseits durch den unterschiedlichen Neigungswinkel der Oberflächenkomponenten relativ zur Sonne, was zu unterschiedlicher Strahlungsenergie pro Flächeneinheit führt (*tilt*). Diese Effekte treten auf verschiedenen Skalen auf. Sie wirken auf der Mikroebene der einzelnen Moleküle oder Kristalle bis hin zur Makroebene der Baumkronen oder der Topographie (Despan und Jacquemoud, 2004). Verschiedene Autoren betonen die Bedeutung der Oberflächenrauigkeit für Albedo-Messungen der schneebedeckten Flächen (Dozier und Painter, 2004; Mondet und Fily, 1999; Warren et al., 1998). Das Potential von Fernerkundungsdaten, aufgenommen aus unterschiedlichen Blickwinkeln, für die Quantifizierung der Oberflächenrauigkeit von Schnee und Eis auf der Subpixel-Skala wurde vor allem an Daten des *Multi-angle Imaging SpectroRadiometer* MISR mit einer räumlichen Auflösung von 275 Metern getestet. Aus den Bändern, aufgenommen aus den Blickwinkeln (+/-60°), wurde ein Quotient berechnet und die Resultate anhand von Laserscanneraufnahmen überprüft. Die Resultate zeigten dabei eine hohe Korrelation mit der Oberflächenrauigkeit, welche aus LIDAR-Referenzdaten abgeleitet wurde (Nolin et al., 2002; Nolin und Payne, 2007; Stroeve und Nolin, 2002). Mushkin und Gillespie (2005) quantifizierten die Oberflächenrauigkeit von Wüstenböden mittels ASTER Daten (räumliche Auflösung: 15 Meter, Blickwinkel: Nadir und -27,6°) und überprüften die Resultate anhand von Feldmessungen. Auch in dieser Untersuchung konnte gezeigt werden, dass die aus den Fernerkundungsdaten abgeleiteten Werte für die Oberflächenrauigkeit stark mit den Werten aus den Referenzmessungen korrelierten. Der Radar-Rückstreukoeffizient reagiert besonders sensitiv auf die Rauigkeit von Materialien. In verschiedene Untersuchungen wurden deshalb SAR-Daten für die Quantifizierung der Oberflächenrauigkeit eingesetzt, wodurch gute Resultate erzielt wurden (Evans et al., 1992; Weeks et al., 1997; Zebker und Goldstein, 1986). Keine dieser Methoden wurde aber bisher auf Lawinenkegel angewendet.

5.3. Direktionale Eigenschaften von Lawinenablagerungen und der ungestörten Schneedecke

Sowohl Lawinenablagerungen wie auch die ungestörte Schneedecke weisen meist eine sehr ähnliche Materialzusammensetzung auf, was eine Unterscheidung dieser zwei Schneetypen allein durch spektrale Eigenschaften erschwert (vgl. Kapitel 4). Die dreidimensionale Struktur der Oberfläche unterscheidet sich aber grundle-

gend. Die raue Oberfläche von Lawinenkegeln besteht aus einer Vielzahl von Ablagerungselementen unterschiedlicher Grösse, welche Schatten werfen. Die ungestörte Neuschneedecke dagegen erscheint bei einem vergleichbaren Betrachtungsmassstab als glatte, schattenfreie Fläche. Dies führt zu unterschiedlichen Ausprägungen der BRDF dieser Schneeoberflächentypen.

5.3.1. BRDF-Effekte der ungestörten Schneedecke

Verschiedene unabhängige Untersuchungen von unterschiedlichen Schneetypen haben gezeigt, dass die ungestörte Schneedecke eine verstärkte Reflexionsintensität in der Richtung zeigt, welche der Sonne entgegengesetzt ist (*forwardscattering*). Abhängig vom Alter, dem Wassergehalt der Schneedecke, vom Verschmutzungsgrad, von der Wellenlänge und weiteren, zum Teil noch unbekannten Faktoren, zeigen sich aber Unterschiede in der Ausprägung dieser Eigenschaften (Green et al., 2002; Leroux et al., 1998; Middleton und Mungall, 1952; Painter, 2002; Peltoniemi et al., 2005; Wiscombe und Warren, 1980). Abbildung 25 zeigt Reflektanz-Plots in der Sonnenhauptebene für zwei unterschiedliche Typen von Schnee. Die Wellenlänge 860 nm entspricht der mittleren Wellenlänge des Nahinfrarotkanals des ADS40-Sensors. Die Grafiken belegen das *forwardscattering* von ungestörten Schneedecken.

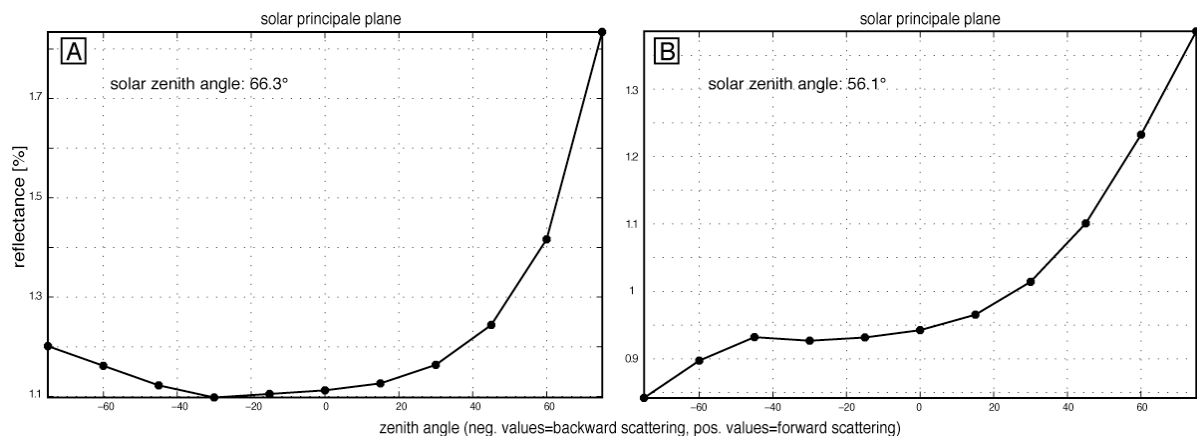


Abbildung 25 Richtungsabhängige Reflektanz von zwei Schneetypen relativ zur Spektralon-Referenzmessung im Nadir für die Wellenlänge 860 nm. Neuschnee (A) und alter Nassschnee (B) (Rey, 2008)

5.3.2. BRDF-Effekte von Lawinenkegeln

Die BRDF der Oberfläche von Lawinenkegeln ist noch nicht untersucht worden. Die raue Oberfläche von Lawinenkegeln verursacht ein Mosaik aus beschatteten und stark reflektierenden Flächen auf kleinem Raum und damit BRDF-Effekte, welche bereits von Auge gut erkennbar sind. Im Gebirge kann beobachtet werden, dass Lawinenkegel deutlich dunkler erscheinen als die angrenzende, ungestörte Schneedecke (Abbildung 26 B). In anderen Fällen tritt der gegenteilige Fall auf und die Lawinenkegel erschienen heller als die ungestörte Schneedecke (Abbildung 26 A).

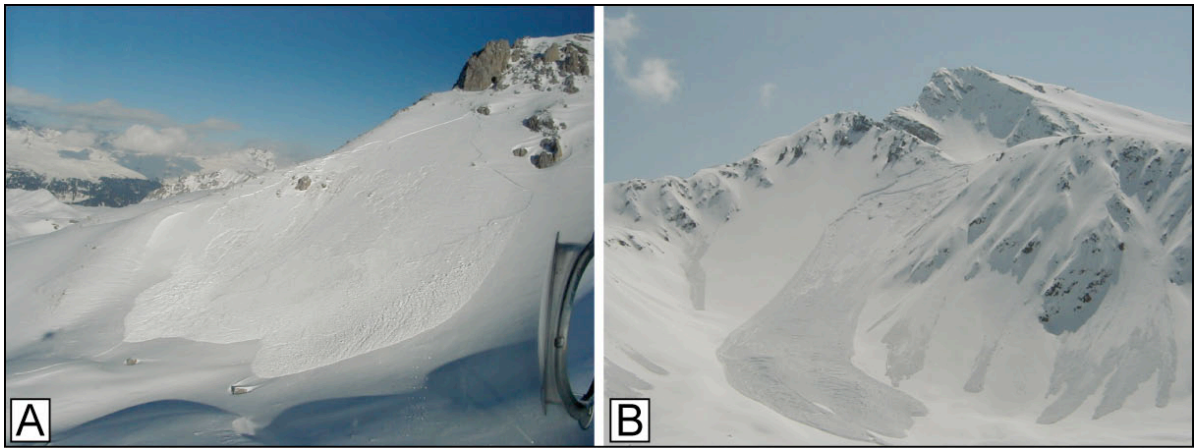


Abbildung 26 Kegel von Schneebrettlawinen welche einmal heller (A) und einmal dunkler (B) erscheinen als die angrenzende, ungestörte Schneedecke (Fotografien: R. Meister)

Die Erklärung dieses Phänomens liegt in der Kombination der BRDF-Effekte von Lawinengegeln mit denen der ungestörten Schneedecke. Während dem der ungestörte Schnee eine ausgeprägte Vorwärtsstreuung zeigt (vgl. Kap. 5.3.1), tritt bei Lawinengegeln ein gegenteiliger Effekt auf (Abbildung 27).

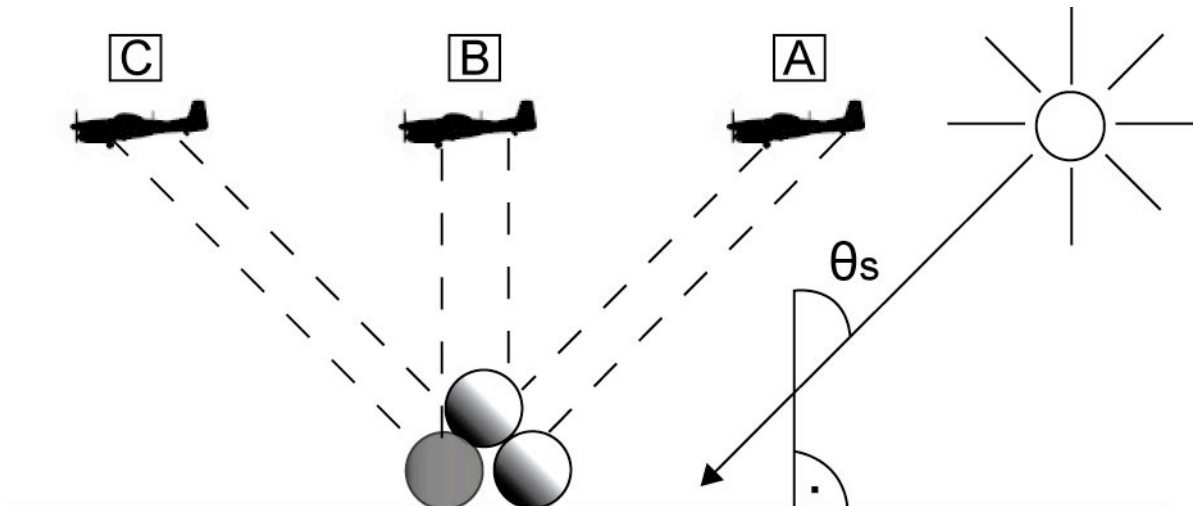


Abbildung 27 Skizze zur Veranschaulichung der BRDF-Effekte auf einem Lawinengegel. Bei vorwärts gerichteter Blickrichtung (A) sind vorwiegend die beleuchteten Regionen des Kegels im Blickfeld des Sensors. Bei Nadir-Blickrichtung (B) sind sowohl beleuchtete wie beschattete Regionen im Blickfeld und bei rückwärts gerichteter Blickrichtung (C) sind vorwiegend die beschatteten Regionen sichtbar

Folgt die Flugrichtung der Sonnenhauptebene wird bei vorwärts gerichteter Blickrichtung ein grosser Anteil der einfallenden Strahlung vom Lawinengegel zum Sensor reflektiert (Situation A in Abbildung 27). Die ungestörte Schneedecke dagegen reflektiert den grössten Anteil der einfallenden Strahlung weg von der Sonne und vom Sensor (*forwardscattering*), sie erscheint vergleichsweise dunkel. Die gegenteilige Situation tritt auf, wenn das Blickfeld des Sensors rückwärts, gegen die Sonne gerichtet ist (Situation C in Abbildung 27). Vom Lawinengegel sind hauptsächlich die beschatteten Gebiete sichtbar, die ungestörte Schneedecke dagegen reflektiert den Grossteil der Strahlung Richtung Sensor. Dadurch lässt sich der in (Abbildung 26 und Abbildung 28) sichtbare Effekt erklären.

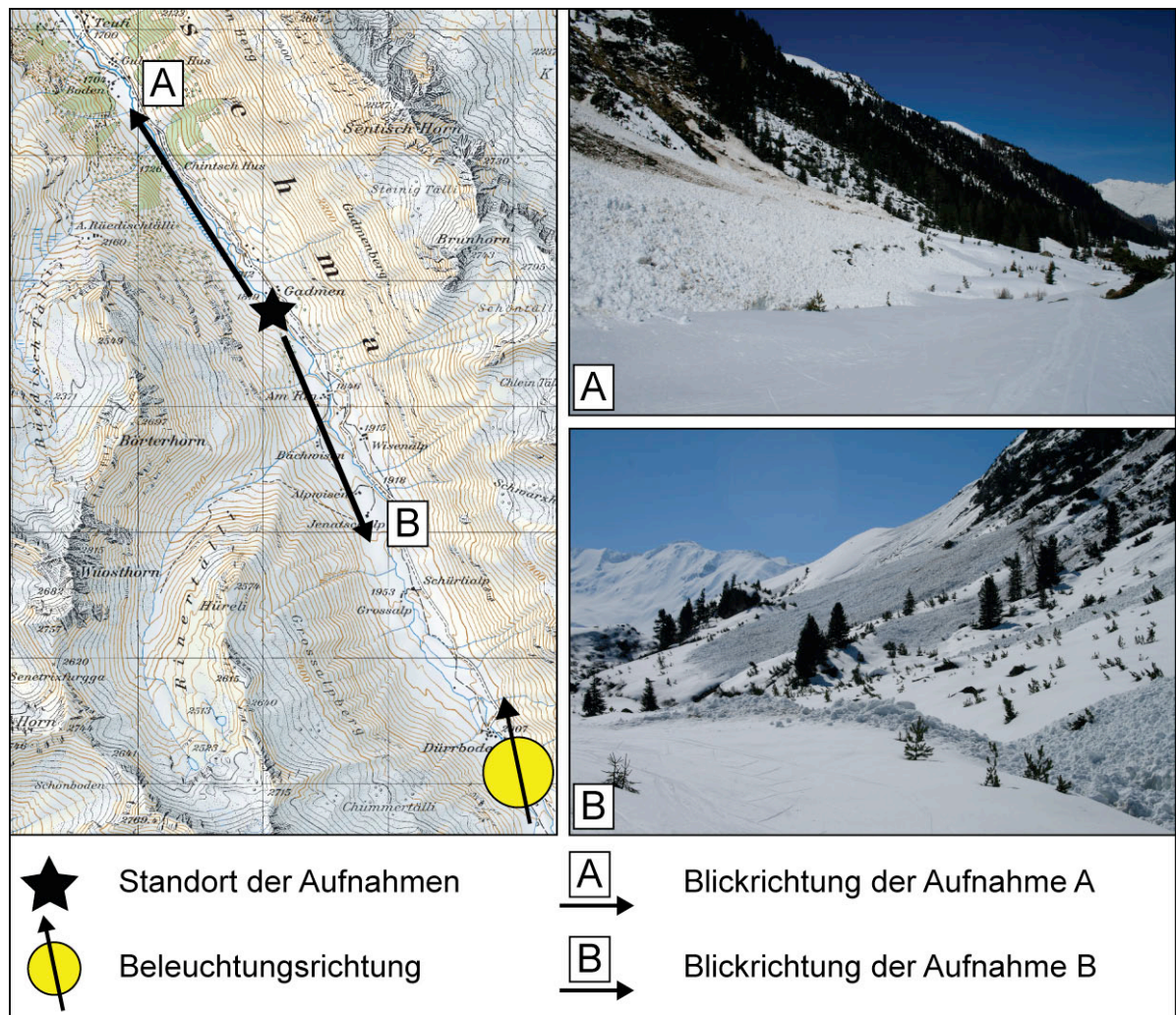


Abbildung 28 BRDF-Effekte von Lawinenkegeln und der ungestörten Schneedecke festgehalten im Dischmatal, Davos, Aufnahmedatum: 27. 04. 2008. Fotografien: A. Hüni, Kartenausschnitt reproduziert mit Bewilligung von swisstopo (BA091356)

Entspricht die Flugrichtung annähernd der Sonnenhauptebene sind die unterschiedlichen direktionalen Effekte von Lawinenkegeln und der ungestörten Schneedecke besonders gut sichtbar. Je grösser der Sonnenzenitwinkel ist, desto ausgeprägter wird der Schattenwurf von nicht planen Objekten wie Lawinenkegeln. Die optimale Erfassungsrichtung für die Vorwärtsstreuung der ungestörten Schneedecke in ebenem Gelände entspricht der spekularen Richtung ausgehend vom Sonneneinstrahlungswinkel (Peltoniemi et al., 2005). Auch für die Erfassung des Schattenwurfes an der Oberfläche von Lawinenkegeln ist diese Richtung gut geeignet. Allerdings ändert sich der spekulare Beobachtungswinkel mit der Exposition und der Hangneigung des Geländes. In Gebieten mit grossen Höhenunterschieden im Relief, verschieden exponierten Hängen und unterschiedlicher Hangneigung ist es deshalb nicht möglich, einen optimalen Beobachtungswinkel gültig für ein grossflächiges Gebiet zu bestimmen.

5.4. Hypothese

Anknüpfend an die in Kapitel 5.3 ausgeführten Überlegungen wird die Hypothese für dieses Kapitel wie folgt formuliert:

Das bidirektionale Reflexionsverhalten von Lawinenkegeln und der ungestörten Schneedecke unterscheidet sich messbar. Abbildende, räumlich hoch aufgelöste Scannerdaten können eingesetzt werden, um diese Unterschiede zu erfassen.

5.5. Anwendung

5.5.1. Datengrundlage

Am 26. April 2008 wurden im Rahmen der Kampagne AVAL08 über dem Untersuchungsgebiet Davos Daten mit dem flugzeuggestützten Luftbildscanner ADS40 erhoben. Eine ausführliche Beschreibung der Daten und des Untersuchungsgebietes folgt in Kapitel 7.4. An dieser Stelle werden nur die Daten, welche für die direktionalen Untersuchungen von Bedeutung sind, kurz beschrieben. In Tabelle 9 sind die Bildkanäle, geordnet nach Aufnahmewinkeln aufgelistet.

Tabelle 9 Spektralkanäle und Blickwinkel der in der Kampagne AVAL08 eingesetzten ADS40 SH52 (Rohrbach, 2006).

Kanal	Wellenlänge	Blickwinkel
Pan	465 – 680 nm	27° vorwärts
Pan	465 – 680 nm	Nadir
Rot	608 – 662 nm	Nadir
Grün	533 – 587 nm	Nadir
Blau	428 – 492 nm	Nadir
Nir	833 – 887 nm	Nadir
Pan	465 – 680 nm	16 ° rückwärts
Rot	608 – 662 nm	16 ° rückwärts
Grün	533 – 587 nm	16 ° rückwärts
Blau	428 – 492 nm	16 ° rückwärts
Nir	833 – 887 nm	16 ° rückwärts

Die panchromatischen Kanäle haben aufgrund der Einstellungsoptimierung auf die multispektralen Kanäle während dieser Flugkampagne saturiert und können nicht verwendet werden. Deshalb stehen für die direktionalen Untersuchungen in dieser Arbeit nur die multispektralen Kanäle mit einem Blickwinkelunterschied von 16° zur Verfügung. Die Nahinfrarotkanäle reagieren besonders sensitiv auf Änderungen von Schneeparametern (Warren, 1982) und wurden deshalb für die nachfolgenden Untersuchungen verwendet. Der Azimuth-Winkel der parallelen Fluglinien betrug 214°. Der Azimut-Winkel der Sonne und damit das Beleuchtungsazimut betrugen 170° bis 183°. Die Abweichung der Fluglinie von der Sonnenhauptebene betrug somit 31° bis 44°. Die Nahinfrarotkanäle mit den Blickwinkeln Nadir und 16° rückwärts wurden annähernd zeitgleich und damit unter konstanten atmosphärischen Bedingungen und bei konstanter Beleuchtung auf-

genommen. Deshalb konnte für den relativen Vergleich der Kanäle auf eine atmosphärische Korrektur verzichtet werden. Eine Beleuchtungskorrektur konnte aufgrund der ungenügenden räumlichen Auflösung des verfügbaren Geländemodells nicht durchgeführt werden. Die Orthorektifizierung der Daten wurde mangels Alternative mit dem digitalen Geländemodell DHM25 der swisstopo durchgeführt (swisstopo, 2005a). Die räumliche Auflösung von 25 Metern im Gelände mit einer Höhe über 2000 Meter über Meer reichte nicht aus, um die Scannerdaten mit einer räumlichen Auflösung von 0,2 Metern präzise geometrisch zu kalibrieren. Deshalb wurden die Daten mit einer $\text{sinc}(x/a)$ Funktion (Hore et al., 2007; Oppenheim und Schaeffer, 1975) auf eine räumliche Auflösung von einem Meter skaliert (vgl. Kapitel 7.4.3).

5.5.2. Untersuchung des Reflexionsverhaltens von Lawinenkegeln, in Abhängigkeit des Blickwinkels

Bereits aus einem einfachen Differenzbild der Nahinfrarotkanäle, aufgenommen aus unterschiedlichen Blickwinkeln, können Rückschlüsse auf die Oberflächenrauigkeit gezogen werden. Während die planen Flächen nur geringfügige Differenzen in den beiden Kanälen aufweisen, führen nicht plane Objekte, aufgrund der Betrachtungsgeometrie, zu deutlich sichtbaren Unterschieden (Abbildung 29). Der Schattenwurf der Ablagerungselemente ist bei den kleineren Kegeln meist weniger stark ausgeprägt als bei Kegeln von grossen Lawinen wie der Salezer-Lawine (Abbildung 30). Allerdings hängt die Dimension der Ablagerungselemente auch vom Lawinentyp ab (z. B. Nass- oder Lockerschneelawine). Intensitätsunterschiede in der aus verschiedenen Blickwinkeln gemessenen reflektierten Strahlung treten deshalb bei grossen Lawinen deutlicher hervor als bei kleinen Lawinen.

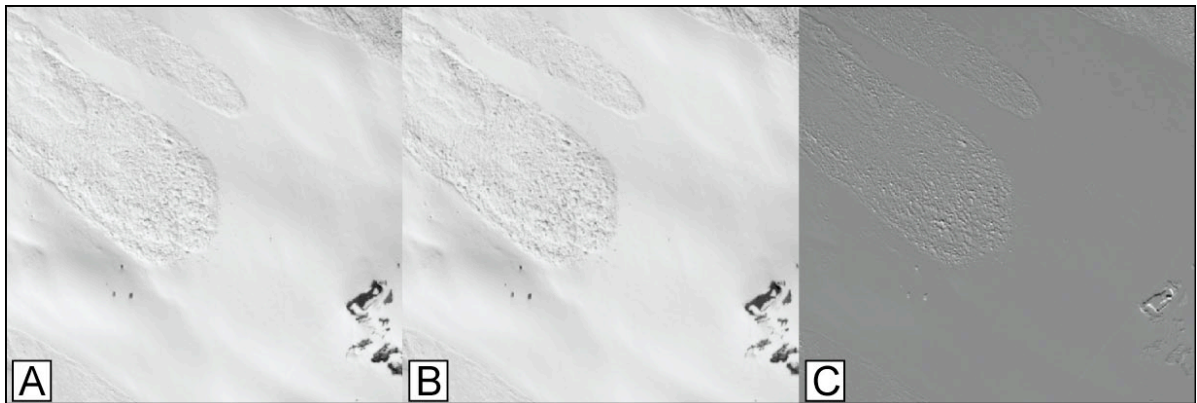


Abbildung 29 Lawinenkegel abgebildet im ADS40 Nahinfrarotkanal aufgenommen aus dem Nadir-Blickwinkel (A), aus dem Blickwinkel 16° rückwärts (B) und das Differenzbild aus diesen zwei Kanälen (C)



Abbildung 30 Lawinenkegel mit kleinen Ablagerungselementen (A) und mit sehr grossen Ablagerungselementen (B, Salezer-Lawine). Fotografien: A) Y. Bühler, B) A. Hüni

Die in Kapitel 5.3.2 ausgeführten Überlegungen werden anhand der ADS40 Daten aus dem Raum Davos überprüft. In drei Testgebieten werden manuell Stichproben gesetzt, basierend auf der visuellen Bildinterpretation. Dabei werden nur Flächen berücksichtigt, welche von Auge eindeutig als Lawinenkegel oder als ungestörte Schneedecke identifiziert werden können. Abbildung 31 zeigt die Stichproben für die drei Testgebiete Dorfberg, Casanna und Hauptertäli. Bei den beprobten Lawinenkegeln handelt es sich, abgesehen von der Dorfberglawine, um kleine Lawinenkegel mit Ablagerungselementen mit einem Durchmesser von weniger als 50 Zentimetern.

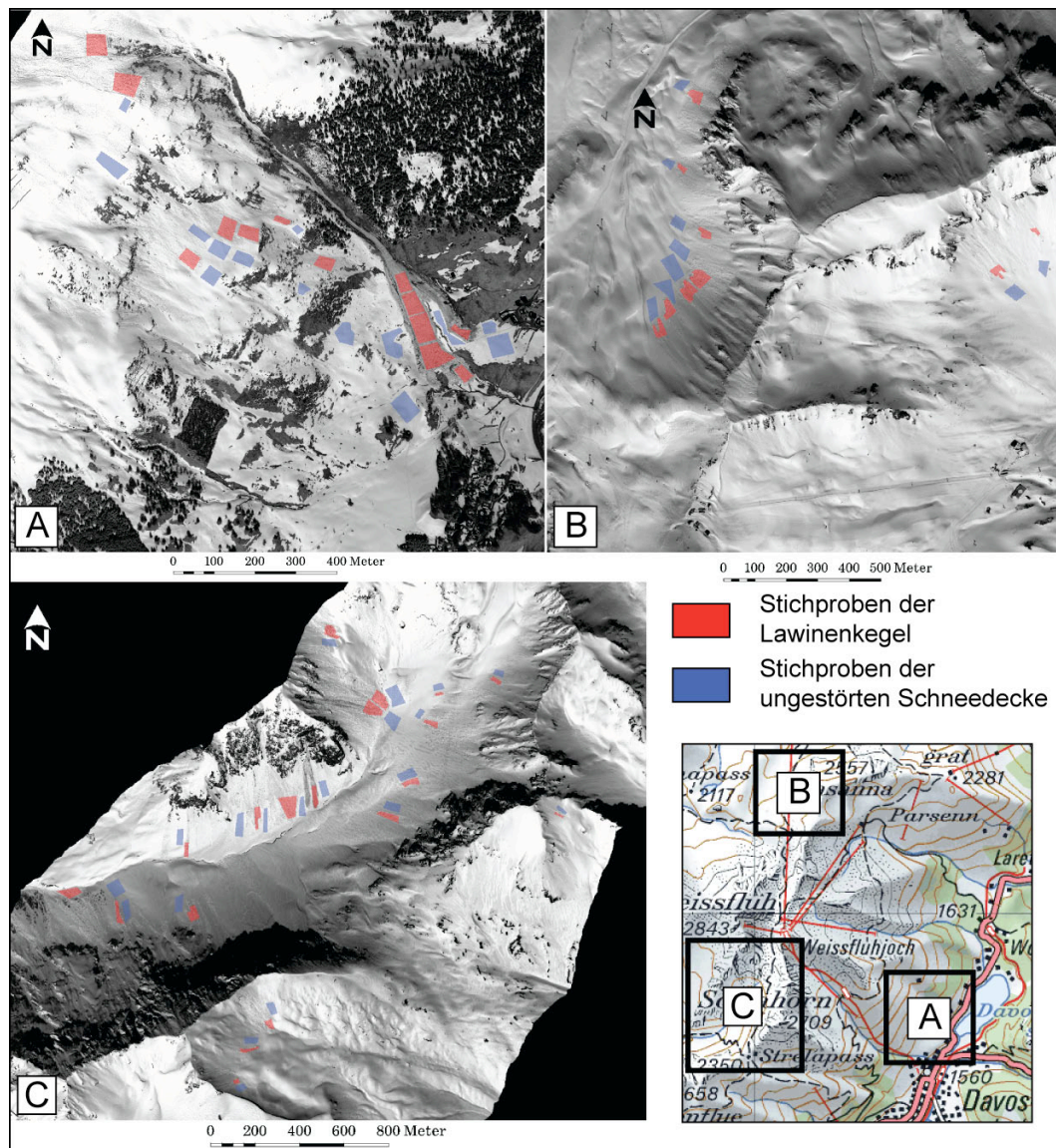


Abbildung 31 Übersicht der Stichproben aus den Testgebieten Dorfberg (A), Casanna (B) und Hauptertälli (C). Kartenausschnitt reproduziert mit Bewilligung von swisstopo (BA091356)

Für die Stichproben wird aus den zwei Nahinfrarotkanälen, aufgenommen aus unterschiedlichen Blickrichtungen, ein *normalized difference angular index* NDAI nach Formel (5) berechnet. Dieser Ansatz zeigte gute Resultate für die Approximation der Oberflächenrauigkeit von Schnee und Eis in Grönland (Nolin et al., 2002; Nolin und Payne, 2007). Die Werte der einzelnen Pixel innerhalb der Stichproben werden gemittelt. Dadurch wird der Einfluss von Ausreißern minimiert.

$$NDAI = \frac{NIR_A - NIR_B}{NIR_A + NIR_B} \quad (5)$$

Wobei:

NIR_A = NIR-Kanal, welcher mehr Schattenanteil auf den Lawinenkegeln misst

NIR_B = NIR-Kanal, welcher weniger Schattenanteil auf den Lawinenkegeln misst

Ergibt der NDAI negative Werte bedeutet das, dass die untersuchte Bildregion im Kanal NIR_A dunklere Regionen aufweist, welche im Kanal NIR_B heller sind. Positive Werte bedeuten das Gegenteil. Das Testgebiet Dorfberg wurde von Südwesten nach Nordosten überflogen. Das Blickfeld des rückwärts ausgerichteten Kanals enthält, aufgrund der Ausrichtung zur Sonne, auf Lawinenkegeln mehr beschattete Flächen als der Nadir-Kanal. Deshalb wird erwartet, dass Lawinenkegel negative NDAI-Werte und die ungestörte Schneedecke positive NDAI-Werte aufweisen. Abbildung 32 zeigt das Ergebnis der Analyse für das Testgebiet Dorfberg, Abbildung 33 die Ergebnisse für das Testgebiet Hauptertälli. Die Werte sind nach der über die Fläche der Stichprobe gemittelten Exposition geordnet. Allerdings beruht die Berechnung der Exposition auf dem DHM25, welches die kleinräumige Variation in der Ausrichtung des Geländes aufgrund der räumlichen Auflösung von 25 Metern nicht wiedergeben kann und deshalb zu Fehlern führt.

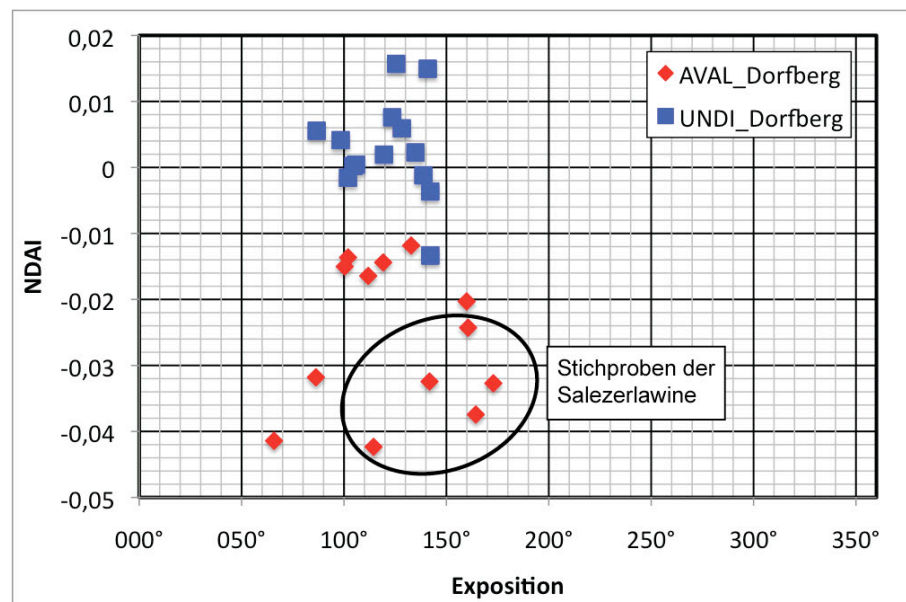


Abbildung 32 Darstellung der NDAI-Werte für die Stichproben der Lawinenkegel (rot, AVAL) und der ungestörten Schneedecke (blau, UNDI) für das Testgebiet Dorfberg abhängig von der Exposition

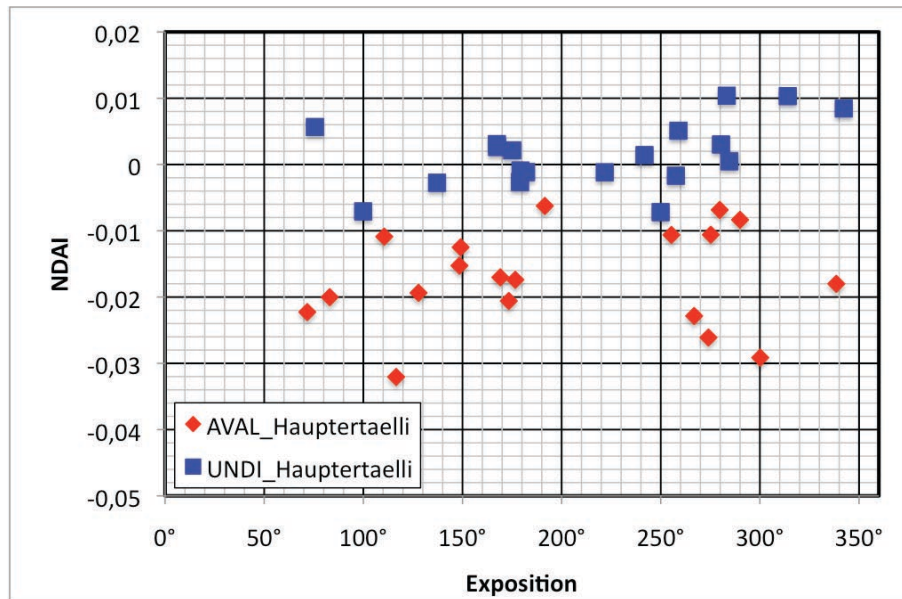


Abbildung 33 Darstellung der NDAI-Werte für die Stichproben der Lawinenkegel (rot, AVAL) und der ungestörten Schneedecke (blau, UNDI) für das Testgebiet Hauptertälli abhängig von der Exposition

Die Stichproben der Lawinenkegel in den Testgebieten Dorfberg und Hauptertälli zeigen meist deutlich negative NDAI-Werte, während die Stichproben der ungestörten Schneedecke schwach negative bis positive Werte aufweisen. Zudem zeigen die Stichproben der Dorfberglawinen mit den vergleichsweise grossen Ablagerungselementen deutlich tiefere Werte als die Mehrheit der Stichproben der kleineren Lawinenkegel (markiert in Abbildung 32).

Die Bedingungen im Testgebiet Casanna sind deutlich ungünstiger für den Versuchsaufbau als diejenigen im Testgebiet Dorfberg. Es finden sich ausschliesslich kleine Lawinenkegel im Testgebiet. Zusätzlich verläuft der Flugpfad von Nordost nach Südwest. Dadurch misst der rückwärtsgerichtete Kanal nicht mehrheitlich die beschattete Fläche des Lawinenkegels, sondern die stark beleuchtete Fläche. Der Kontrast zum Nadir-Kanal, welcher aufgrund der kleinen Ablagerungselemente auf den Kegeln nur wenig Schattenanteil misst, ist gering (vgl. Abbildung 27). Diese Voraussetzungen legen die Vermutung nahe, dass die Unterschiede zwischen den NDAI-Werten der beiden Klassen kleiner sind als im Testgebiet Dorfberg. Abbildung 34 zeigt das Ergebnis der Analyse.

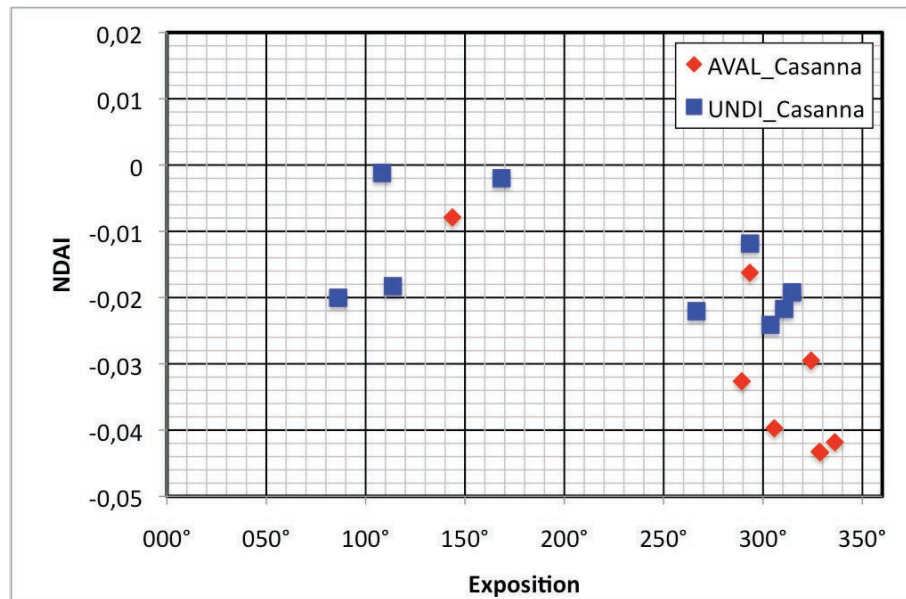


Abbildung 34 Darstellung der NDAI-Werte für die Stichproben der Lawinenkegel (rot, AVAL) und der ungestörten Schneedecke (blau, UNDI) für das Testgebiet Casanna abhängig von der Exposition

Die NDAI-Werte der Stichproben im Testgebiet Casanna ergeben keine positiven Werte. Der Nadir-Kanal ist bei allen Stichproben dunkler als der rückwärts blickende Kanal. Die Vorwärtsstreuung der ungestörten Schneedecke kann vom Nadir-Kanal nicht erfasst werden, da der Beobachtungswinkel eine zu grosse Differenz zum optimalen Winkel aufweist. Dadurch wird der Kontrast der ungestörten Schneedecke gegenüber den Lawinenkegeln reduziert. Dennoch liegen die NDAI-Werte der Lawinenkegelstichproben im NIR-Kanal bei vergleichbarer Exposition tiefer als die Werte im rückwärts blickenden Kanal. Aus dieser Beobachtung lässt sich schliessen, dass die untersuchte Methode auch bei suboptimalen Bedingungen angewendet werden kann. Allerdings ist die Methode in solchen Fällen deutlich anfälliger für Fehler.

5.6. Schlussfolgerungen

Die BRDF von Lawinenkegeln und der ungestörten Schneedecke unterscheiden sich deutlich. Die ungestörte Schneedecke reflektiert die einfallende Strahlung aufgrund der glatten Oberflächenstruktur mehrheitlich in die der Sonne entgegengesetzte Richtung (*forwardscattering*) (Peltoniemi et al., 2005). Lawinenkegel dagegen reflektieren die einfallende Strahlung aufgrund der rauen Oberfläche verstärkt in die Richtung der Sonneneinstrahlung (*backwards scattering*). Dieser Effekt zeigt sich bei grossen Ablagerungselementen deutlich stärker als bei kleinen.

Wie die Untersuchung anhand von Stichproben in verschiedenen Testgebieten zeigt, können diese Unterschiede mit abbildenden, räumlich hoch aufgelösten Scannerdaten gemessen werden. Um ein zuverlässiges Resultat zu erhalten, müssen folgende Punkte beachtet werden:

- Grundsätzlich lässt sich festhalten, dass die optimalen Beobachtungsrichtungen der Beleuchtungsrichtung und der Richtung in der maximales *for-*

wardscattering auftritt entsprechen. Allerdings hängen diese Richtungen direkt von der Geländegeometrie (Exposition und Hangneigung) ab. Im hochalpinen Terrain existieren auf engem Raum sehr unterschiedliche Geländegeometrien. Eine Beleuchtungskorrektur könnte dieses Problem entschärfen. Allerdings ist für die Korrektur von räumlich derart hoch aufgelösten Daten ein sehr präzises Oberflächenmodell mit einer räumlichen Auflösung von weniger als einem Meter nötig. Ein solches Modell existiert für Alpine Regionen in der Schweiz, welche über 2000 m ü. M. liegen noch nicht.

- Je grösser die Differenz der verwendeten Blickwinkel ist, desto deutlicher treten die BRDF-Unterschiede zwischen Lawinenkegeln und der ungestörten Schneedecke hervor. Allerdings ergibt sich bei flachen Beobachtungswinkeln im Alpinen Gelände das Problem, dass vermehrt Flächen nicht mehr sichtbar sind, da sie vom Sensor aus gesehen hinter Bergflanken liegen. Die kleine Blickwinkeldifferenz von 16° , welche in diesem Experiment verwendet wurde, reicht bereits aus, um Unterschiede zu erfassen. Es ist aber zu erwarten, dass die Resultate bei grösserer Blickwinkeldifferenz noch deutlich prägnanter ausfallen. Diese Vermutung muss aber mit weiteren Untersuchungen anhand zusätzlicher Daten belegt werden.
- Je tiefer die Sonne über dem Horizont steht, desto stärker wird der Schattenwurf auf rauen Oberflächen wie Lawinenkegeln. Allerdings verstärkt sich dadurch auch der Schattenwurf des Reliefs und grosse Gebiete liegen im Schlagschatten. In diesen Regionen kann die vorgeschlagene Methode nicht oder nur mit Einschränkungen verwendet werden.
- Die optimale Flugrichtung verläuft parallel zu Sonnenhauptebene, da in dieser Richtung die BRDF-Unterschiede am stärksten ausgeprägt sind.
- Eine präzise geometrische Kalibrierung der verwendeten Kanäle zueinander ist wichtig, damit die BRDF-Unterschiede nicht von geometrischen Verschiebungen zwischen den Kanälen überlagert werden und deshalb nicht mehr erfasst werden können.

Aufgrund der Ergebnisse der Untersuchung in Kapitel 5.5.2 ist die Hypothese aus Kapitel 5.4 verifiziert. Allerdings müssen weitere Untersuchungen folgen, um sicherzustellen, dass diese Methode auch bei abweichenden Bedingungen funktioniert (z. B. veränderter Sonnenstand, andere Beobachtungswinkel, weitere Typen von Lawinenablagerungen, weitere Sensoren etc.). Da die Untersuchung mit Daten skaliert auf eine räumliche Auflösung von einem Meter erfolgreich ist, liegt die Vermutung nahe, dass auch satellitengestützte, räumlich hoch aufgelöste Sensoren wie QuickBird oder GeoEye-1 verwendet werden können. Um diese Vermutung zu bestätigen sind weitere Untersuchungen nötig.

Kapitel 6

Charakterisierung der Textureigenschaften von Lawinenablagerungen

6.1. Einleitung

Lawinenablagerungen sind von Auge meist gut erkennbar (Abbildung 35). Die Oberfläche von Lawinenkegeln ist deutlich rauer als diejenige der ungestörten Schneedecke. Dadurch entsteht ein Mosaik aus Schattenwurf und stark reflektierenden Flächen. Dies führt zu einer ausgeprägten Variation der Helligkeit innerhalb einer begrenzten Fläche. Darauf reagiert die visuelle Wahrnehmung des Menschen empfindlich (Julesz, 1962) (vgl. Abbildung 36).

Textur kann als Funktion der räumlichen Variation der Helligkeit von Bildelementen definiert werden (Estes et al., 1983; Lillesand und Kiefer, 2000; Tuceryan und Jain, 1998). Aufgrund der ausgeprägten räumlichen Variation der Helligkeit auf der Oberfläche eines Lawinenkegels ist Textur ein vielversprechender Parameter für die Erfassung und Kartierung von Lawinenablagerungen in abbildenden Fernerkundungsdaten.

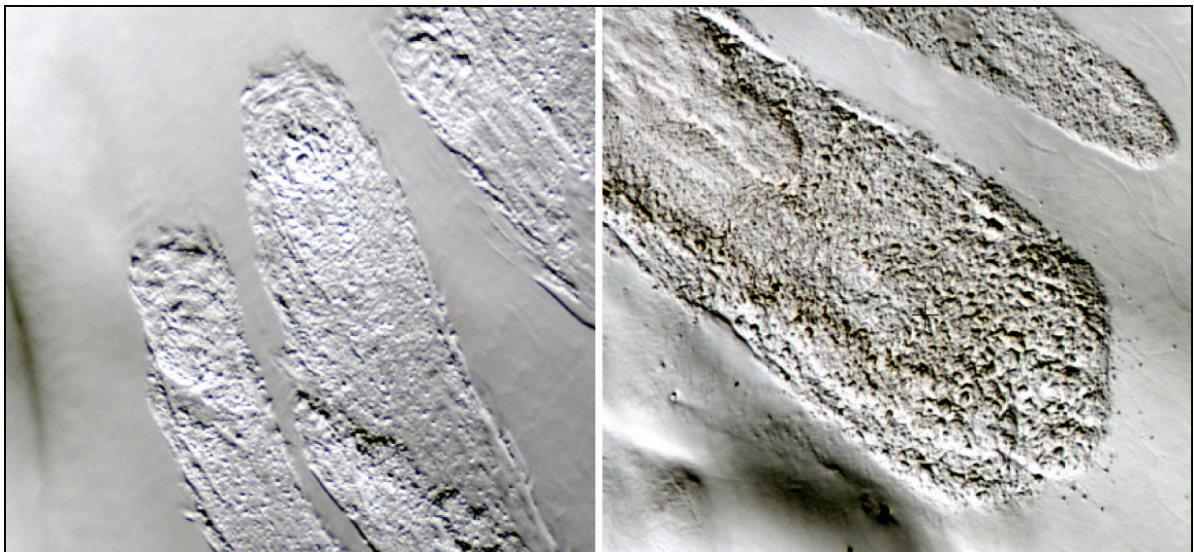


Abbildung 35 Luftbildscanner-Aufnahmen (ADS40) von frischen Lawinenkegeln und der angrenzenden, ungestörten Schneedecke.

Neben der erwähnten Definition von Textur existieren noch viele weitere Definitionen, abhängig von den jeweiligen Anwendungsgebieten (Tuceryan und Jain, 1998). Coggins (1982) gibt einen Überblick über verschiedene Definitionen des Begriffes Textur in der Literatur.

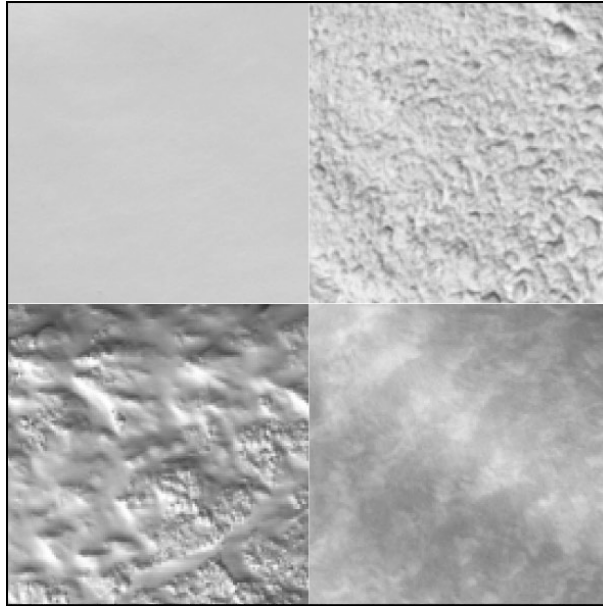


Abbildung 36 Unterschiedliche Texturen von Schneeoberflächen in den ADS40 Daten, welche durch die visuelle Wahrnehmung des Menschen gut unterschieden werden können.

Die Textur von Objekten ist, neben den spektralen und kontextabhängigen Objekteigenschaften, die wichtigste Informationsquelle für die Interpretation von Fernerkundungsdaten (Haralick et al., 1973; Lillesand und Kiefer, 2000). Die Komponenten einer Textur sind a) die Objektprimitiven, welche die Grundeinheiten der Textur bilden und b) die Anordnung dieser Elemente innerhalb eines Objektes (Haralick, 1979). Die Wahrnehmung der Textur wird massgeblich durch den Betrachtungsmaßstab beeinflusst (Julesz, 1962). Eine Tischplatte aus Holz wird beispielsweise bei einem Betrachtungsabstand von mehreren Metern als homogene Fläche wahrgenommen. Wird aber der Abstand reduziert, werden feine Texturen wie die Faserung des Holzes sichtbar.

Die offensichtlichste Anwendung von Texturinformation ist das Erkennen von Objekten anhand der Textur. Dieses Vorgehen wird Textur-Klassifikation (*texture classification*) genannt. Eine weitere wichtige Anwendung ist die Abgrenzung von unterschiedlichen Regionen anhand der Textur, die Textur-Segmentation (*texture segmentation*). Die Textur-Synthese (*texture synthesis*) wird in der Computergraphik oft zur Kompression von Daten und zur Herstellung künstlicher, aber möglichst realitätsnaher Oberflächenstrukturen verwendet und stellt eine weitere bedeutende Anwendung dar (Tuceryan und Jain, 1998). Texturinformation wird für Anwendungen in sehr unterschiedlichen Fachgebieten eingesetzt. So zum Beispiel für die Qualitätsprüfung von Textilien (Dewaele et al., 1988) und Bauholz (Connors et al., 1983), in der Medizin für die automatische Klassierung von Lungenerkrankungen (Sutton und Hall, 1972) oder bösartigen Leukämietumoren im Blut (Harms et al., 1986) und in der automatisierten Verarbeitung von Dokumenten (Wahl et al., 1982; Wang und Srihari, 1989).

In der Schnee- und Lawinenforschung spielen Texturen vor allem auf der Mikroebene der Kristallstruktur eine wichtige Rolle (vgl. Kapitel 3.5.3, S. 29), weil sie wichtige Informationen über den Schneedeckenaufbau liefern (Jamieson und

Schweizer, 2000; Lutz et al., 2007; Pielmeier et al., 2001; Schneebeil et al., 1999). Anwendungen auf der Makroebene existieren vor allem für die Kartierung von schneebedecktem Meereis in SAR-Daten (Soh und Tsatsoulis, 1999). Obwohl die Oberflächenrauigkeit der Schneedecke die Intensität der reflektierten Strahlung massgeblich beeinflusst, werden Texturinformationen noch kaum zur Klassierung der räumlichen Verteilung von Schneeoberflächeneigenschaften eingesetzt (Leroux und Fily, 1998; Mondet und Fily, 1999; Warren et al., 1998). In diesem Bereich besteht bis heute eine Forschungslücke.

Texturanalysen werden für die Auswertung von Fernerkundungsdaten bereits seit längerer Zeit eingesetzt. Im Bereich der Forstindustrie verwenden zum Beispiel Pouliot et al. (2006) Texturmasse für die Überwachung von Baumbeständen und Sträuchern mittels Luftbildern. Champion et al. (2008) nutzen Texturmasse für die Abschätzung des Alters von Waldbeständen in Luftbildern. Kuplich et al. (2005) bewerten die Regeneration von tropischen Regenwäldern mit Hilfe von Texturmassen, angewendet auf SAR Satellitendaten. Im Bereich der Landnutzungskartierung in optischen Luftbild- und Satellitendaten werden Texturmasse häufig für Klassifikation von Wasserflächen, Waldflächen, Siedlungsgebieten und Grasflächen eingesetzt (Caridade et al., 2008; Lee und Philpot, 1991; Sali und Wolfson, 1992). Dabei wird die Textur vorwiegend als zusätzliche Informationsquelle verwendet. Vermehrt werden Texturen aber auch für spezielle Fragestellungen gezielt untersucht. So führen Proisy et al. (2007) texturbasierte Schätzungen der Biomasse von Mangrovenwäldern in räumlich hoch aufgelösten IKONOS-Satellitendaten durch und Kayitakire et al. (2006) bestimmen Waldstrukturparameter mit Daten desselben Sensors. Tsai und Chou (2006) kartieren invasive Pflanzenarten mittels QuickBird-Daten. Tuttle et al. (2006) benutzen ASTER Satellitendaten um Habitatsanalysen von Singvögeln durchzuführen. Trotz dieser Beispiele von vielversprechenden Anwendungen werden Texturmasse, verglichen mit spektralen Analysen, für die Analyse von optischen Fernerkundungsdaten noch vergleichsweise selten eingesetzt.

6.2. Grundlagen der Texturanalyse

In digitalen Bilddaten können Helligkeitsunterschiede und damit Texturen mittels statistischer Methoden quantifiziert werden. In der Literatur existieren sehr unterschiedliche Ansätze, die Textur von Objekten zu erfassen und zu messen. Bereits einfach zu berechnende Texturmasse, abgeleitet aus der Statistik erster Ordnung, beschreiben Aspekte der Textur von Objekten. Aussagekräftiger sind Masse basierend auf der Statistik zweiter Ordnung, da sie den Wechsel der Helligkeit zwischen den Bildelementen und damit die räumliche Komponente der Textur berücksichtigen. Diese Masse werden in der lokalen Umgebung eines Pixels mittels einer quadratischen Filterbox ermittelt. Die Änderungen der Helligkeit im Bild kann auch als Komposition verschiedener Frequenzen betrachtet werden. Darauf basieren Methoden wie die Fourier Transformation (Estes et al., 1983; Tuceryan und Jain, 1998), die Wavelet Transformation (Daubechies et al., 1992; Mallat, 1989) oder geometrische Modelle (Chen et al., 1997; Tuceryan und Jain, 1998).

Die letztgenannten Methoden eignen sich vor allem für Texturen mit einer ausgeprägten Richtungsabhängigkeit. Weil aber Lawinenkegel nur in Ausnahmefällen eine deutlich gerichtete Textur aufweisen, sind diese Ansätze für die vorliegende Fragestellung kaum geeignet und werden in dieser Arbeit nicht weiter untersucht.

6.2.1. Statistik erster Ordnung: Histogramm-Analyse

Verschiedene statistische Masse, welche Aussagen über die Textur eines Objektes erlauben, können basierend auf dem Histogramm eines Bildkanals berechnet werden. Insbesondere Masse wie Mittelwert und Standardabweichung werden in Klassifikationen häufig eingesetzt (Dekker, 2003; Unser, 1986). Allerdings berücksichtigen diese Masse die räumliche Komponente der Textur nicht und sind somit für die Beschreibung der Textur von Objekten nur bedingt geeignet. Andererseits ist die Berechnung dieser Masse einfach und benötigt wenig Prozessierungszeit. In Tabelle 10 werden die gebräuchlichsten Texturmasse der Statistik erster Ordnung aufgelistet (Bahrenberg et al., 1990; PCI, 2005).

Für die Formeln in Tabelle 10 gilt:

i	=	<i>Position in der Filterbox in horizontaler Richtung</i>
j	=	<i>Position in der Filterbox in vertikaler Richtung</i>
$x_{i,j}$	=	<i>Wert an der Stelle i, j</i>
x_c	=	<i>Wert des Zentrumspixels</i>
N	=	<i>Anzahl Pixel in der quadratischen Filterbox ($n \times n$ Pixel)</i>
μ	=	<i>Mittelwert</i>
s	=	<i>Standardabweichung</i>

Tabelle 10 Masse der Statistik erster Ordnung abgeleitet aus dem Histogramm innerhalb der quadratischen Filterbox im Ortsraum (Dekker, 2003; PCI, 2005)

Mass	Beschreibung	Formel
a) Mittelwert	Arithmetisches Mittel aller Pixel in der Filterbox, Durchschnitt.	$\bar{x} = \frac{\sum_{i,j} x_{i,j}}{n} \quad (6)$
b) Median	Zentralwerte der Filterbox. Alle Werte innerhalb der Filterbox werden dadurch in eine untere und eine obere Hälfte geteilt.	$Me = \frac{1}{2}(x_k + x_{k+1}) \quad (7)$
c) Mittlere Abweichung vom Mittelwert	Mittelwert der absoluten Abweichungen zwischen den Pixelwerten innerhalb der Filterbox und dem Mittelwert.	$\Delta\bar{x} = \frac{\left(\sum_{i,j} x_{i,j} - \mu\right)}{n} \quad (8)$
d) Mittlere Abweichung vom Median	Mittelwert der absoluten Abweichungen zwischen den Pixelwerten innerhalb der Filterbox und dem Median.	$\Delta Me = \frac{\left(\sum_{i,j} x_{i,j} - Me\right)}{n} \quad (9)$
e) Mittlere euklidische Distanz	Distanz zwischen den Pixelwerten der Filterbox und dem zentralen Pixel der Filterbox.	$d_{ek} = \frac{\sqrt{\sum_{i,j} (x_{i,j} - x_c)^2}}{(n-1)} \quad (10)$
f) Varianz	Mittlere quadratische Abweichung der einzelnen Pixelwerte vom arithmetischen Mittelwert.	$s^2 = \frac{\sum_{i,j} (x_{i,j} - \mu)^2}{n} \quad (11)$
g) Normalisierter Koeffizient der Varianz	Mass für die Variabilität der Pixelwerte, normalisiert durch den Mittelwert	$K = \frac{\sqrt{s^2}}{\mu} \quad (12)$
h) Schiefe (Skewness)	Schiefe der Verteilung, drittes zentrales Moment	$skew = \frac{\left(\sum_{i,j} x_{i,j} - \mu\right)^3}{(n-1) \times (s^2)^{\frac{3}{2}}} \quad (13)$
i) Wölbung (Kurtosis)	Wölbung der Verteilung, viertes zentrales Moment	$kur = \frac{\left(\sum_{i,j} x_{i,j} - \mu\right)^4}{(n-1) \times (s^2)^2} \quad (14)$
j) Energie (Energy)	Gesamte Magnitude der Werte in der Filterbox	$energy = \sum_{i,j} (x_{i,j})^2 \quad (15)$
		$ent = \sum_{i,j} p_{i,j} \times \ln(p_{i,j}) \quad (16)$
k) Entropie (Entropy)	Mass für die Unordnung innerhalb der Filterbox	wobei $p_{i,j} = \frac{x_{i,j}}{\sum_{i,j} x_{i,j}}$

6.2.2. Statistik zweiter Ordnung: Texturmasse nach Haralick

Um der räumlichen Komponente der Textur Rechnung zu tragen, berücksichtigen die Texturmasse nach Haralick die räumliche Nachbarschaft zu weiteren Pixeln. Wir können die Textur eines Objektes erst dann wahrnehmen, wenn eine gewisse Anzahl von Grauwerten in einem Objekt enthalten ist. Statistik zweiter Ordnung (*second order statistic*) basiert auf dieser räumlichen Verteilung der Nachbarschaftsbeziehung zwischen Pixelwerten. Im Gegensatz dazu basiert die Statistik erster Ordnung (vgl. Kap. 6.2.1) nur auf einzelnen Grauwerten ohne deren räumliche Verteilung zu beachten (Tuceryan und Jain, 1998).

6.2.2.1. Grey Level Co-occurrence Matrix

Co-occurrence Matrix Analysen sind bereits mehrfach angewendet worden und zählen zu den am Besten bekannten und am weitesten verbreiteten Methoden zur Analyse von Texturen in Bilddaten (Tuceryan und Jain, 1998). Haralick schlägt für die Erfassung von Texturen eine Matrix der räumlichen Abhängigkeit von Grauwerten vor (*grey level co-occurrence matrix* GLCM). In dieser Matrix wird eingetragen, wie oft die Nachbarschaft von zwei Pixelwerten in einer bestimmten Richtung auftritt. Abbildung 37 zeigt zur Veranschaulichung einen quadratischen Bildausschnitt mit einfacher Textur und die vom Objekt abgeleiteten GLCM. Die nachfolgenden Ausführungen basieren im wesentlichen auf Clausi (2002), Haralick et al. (1973), Haralick (1973), Haralick (1979) und PCI (2005).

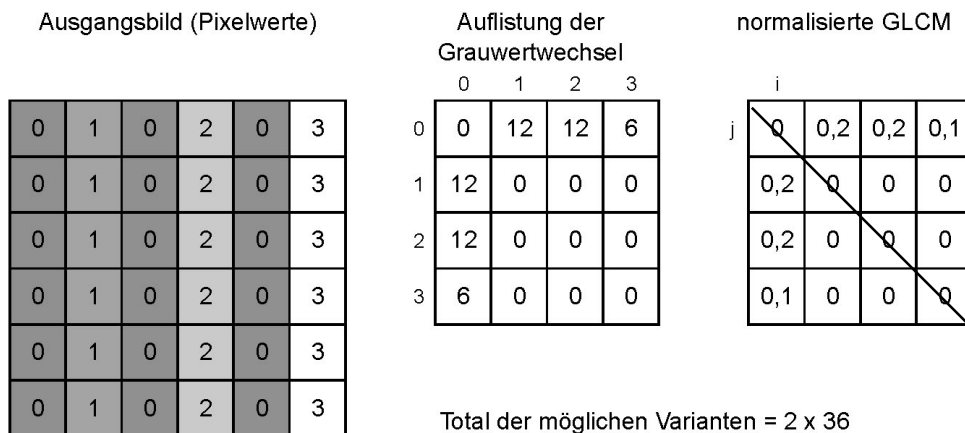


Abbildung 37 Beispiel für eine Grey Level Co-occurrence Matrix GLCM in horizontaler Richtung für ein Objekt mit einfacher Textur

Im ersten Schritt der GLCM Generierung werden alle möglichen Grauwertwechsel in einer vorgegeben Hauptrichtung und der entgegengesetzten Richtung summiert und in der GLCM eingetragen. Damit die Vergleichbarkeit von Objekten unterschiedlicher Grösse gewährleistet ist, wird die GLCM im zweiten Schritt mit der Anzahl total möglicher Varianten normalisiert. In der normalisierten GLCM liegen nun alle homogenen Nachbarschaften in der Nähe der Diagonalen (z. B. Nachbarschaft der Werte Null und Null, Eins und Eins etc.). Im Gegensatz dazu

liegen alle grossen Kontrastsprünge zwischen zwei Pixelwerten weit entfernt von der Diagonalen. Aus dieser Matrix können nun verschiedene Werte, welche die Textur von Objekten charakterisieren, berechnet werden.

6.2.2.2. Parameter

Für die Berechnung der GLCM sind neben der räumlichen Auflösung der Daten drei weitere Parameter massgebend:

a) *Kantenlänge der Filterbox*

Da die Textur eine ausgeprägt räumlich Komponente beinhaltet, kommt der Grösse der Filterbox eine entscheidende Bedeutung zu (Haralick et al., 1973; Tuceryan und Jain, 1998). Nur wenn die charakteristische Variation der Grautonwerte von der Filterbox als Ganzes erfasst wird, kann die Textur durch die GLCM erfasst werden. Wird die Filterbox aber zu gross gewählt, steigt die Gefahr, dass benachbarte Objekte die Werte verfälschen. Bei der Wahl der optimalen Kantenlänge der Filterbox muss die räumliche Auflösung der Daten berücksichtigt werden. Der Rechenaufwand nimmt mit zunehmender Dimension der Filterbox exponentiell zu.

b) *Richtung*

Die Berechnung der GLCM ist richtungsabhängig. Eine Vielzahl natürlicher und vor allem anthropogener Texturen weist eine deutliche Richtungsabhängigkeit auf. Abbildung 38 zeigt die verwendeten Hauptrichtungen für die Texturanalyse nach Haralick. In verschiedenen Untersuchungen zur Klassierung von Fernerkundungsdaten mittels Texturinformationen spielt die Richtungsabhängigkeit eine zentrale Rolle (Delenne et al., 2008; Karathanassi et al., 2000). Bei Lawinenkegeln wird aber, abgesehen von ausgeprägten Fliesstrukturen, welche relativ selten auftreten, keine signifikante Richtungsabhängigkeit der Textur erwartet.

c) *Distanz zwischen den Pixeln*

Meist werden bei der Berechnung der GLCM nur die direkt benachbarten Pixel berücksichtigt. Abhängig von den räumlichen Eigenschaften der untersuchten Textur können aber Abstände von mehr als einem Pixel deutlich aussagekräftiger sein (Chen et al., 1989; Soh und Tsatsoulis, 1999). Lawinenkegel können, abhängig von der Grösse der Schneebrocken, sehr unterschiedliche Texturdimensionen aufweisen.

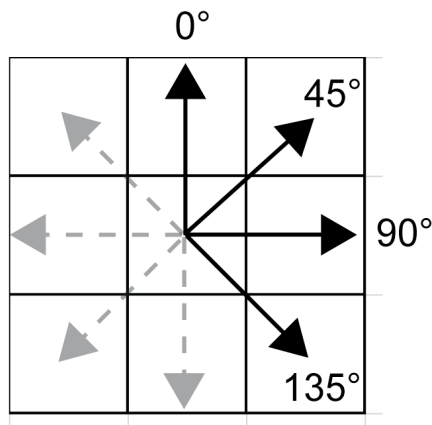


Abbildung 38 Verwendete Haupttrichtungen für die Berechnung der GLCM mit Abstand ein Pixel (Definiens, 2007)

6.2.2.3. Abgeleitete Texturmasse

Die Texturmasse nach (Haralick et al., 1973), welche in dieser Arbeit verwendet werden, sind nachfolgend kurz beschrieben. Für die nachfolgenden Formeln gilt:

i	=	Position in der GLCM in horizontaler Richtung
j	=	Position in der GLCM in vertikaler Richtung
$P_{i,j}$	=	Wert der normalisierten GLCM an der Stelle i, j
N	=	Anzahl unterschiedliche Grauwerte im Ausgangsobjekt
μ	=	Mittelwert
σ	=	Standardabweichung

- a) *Homogeneity* HOM (auch *Inverse Difference Moment*)

$$HOM = \sum_{i,j=0}^{N-1} \frac{P_{i,j}}{1 + (i - j)^2} \quad (17)$$

Die Werte sind hoch, wenn die meisten Einträge in der GLCM auf der Diagonale liegen. Dies ist der Fall, wenn die Untersuchungsobjekte lokal homogen sind.

- b) *Contrast* CON

$$CON = \sum_{i,j=0}^{N-1} P_{i,j} (i - j)^2 \quad (18)$$

Die Werte verhalten sich konträr zu den Homogenitätswerten. Liegen die meisten Einträge in der GLCM weit abseits der Diagonalen, ist dies ein Hinweis auf eine hohe lokale Variation der Grauwerte.

c) *Dissimilarity* DIS

$$DIS = \sum_{i,j=0}^{N-1} P_{i,j} |i - j| \quad (19)$$

Dieses Mass ist fast identisch mit dem Mass *Contrast*. Allerdings wird die Abweichung von der Diagonalen weniger stark gewichtet. Die Masse *Dissimilarity* und *Contrast* korrelieren stark.

d) *Mean* MEA

$$MEA = \frac{\sum_{i,j=0}^{N-1} P_{i,j}}{N^2} \quad (20)$$

Dieses Mass beschreibt den Mittelwert basierend auf der GLCM.

e) *Variance* VAR (*Quadrat der Standardabweichung*)

$$VAR = \sum_{i,j=0}^{N-1} P_{i,j} \times (i - \mu_i)^2 \quad (21)$$

Dieses Mass gibt Aufschluss über die Abweichung der Einträge in der GLCM vom Mittelwert.

f) *Entropy* ENT

$$ENT = \sum_{i,j=0}^{N-1} P_{i,j} (-\ln P_{i,j}) \quad (22)$$

Entropy kann als Mass für die Ordnung oder Unordnung innerhalb eines Objektes angesehen werden. Der Wert ist hoch, wenn die GLCM-Werte relativ ähnlich sind. Liegen sie nahe bei Eins oder Null, sind die Pixelnachschaften ungleich verteilt und das Mass wird klein.

g) *Angular 2nd Moment* ASM (*auch Energy*)

$$ASM = \sum_{i,j=0}^{N-1} P_{i,j}^2 \quad (23)$$

Dies ist die gegenteilige Funktion der *Entropy* und korreliert deshalb stark mit diesem Mass. Sind in der GLCM wenige grosse Werte, wird das Mass gross, sind alle Werte ähnlich wird das Mass klein.

h) *Correlation* COR

$$COR = \frac{\sum_{i,j=0}^{N-1} P_{i,j} (i - \mu_i) (j - \mu_j)}{\sigma_i \sigma_j} \quad (24)$$

Correlation ist ein Mass für die lineare Abhängigkeit der Grauwerte benachbarter Pixel. Wenn die Skala der Textur viel grösser als die Distanz zwischen den benachbarten Pixeln ist, wird der Wert gross. Ist die Texturskala aber in der Grössenordnung der Distanz, wird der Wert klein.

GLCM Analysen sind heute in verschiedenen Softwarepaketen zur Verarbeitung von Fernerkundungsdaten implementiert (Definiens, 2007; PCI, 2005). Allerdings werden die Möglichkeiten der Texturanalyse wenig genutzt. Gründe dafür könnten der hohe Zeitbedarf für die Berechnung der GLCM und die eingeschränkte Bekanntheit der Methode von Haralick unter den Benutzern der Software sein. Wird die Methode angewendet, so werden die Parameter zum Teil unsystematisch durch ausprobieren bestimmt, was den Erfolg der Methode deutlich schmälern kann (Pesaresi, 2000). Texturmasse wurden in der Vergangenheit verbreitet in Kombination mit spektralen Informationen für die Klassifikation von Fernerkundungsdaten eingesetzt. So benutzen Haralick et al. (1973) Texturmasse zur Klassifikation von Landnutzungsklassen in digitalisierten Luftbildern und ERTS Satellitendaten, Caridade et al. (2008) in digitalisierten panchromatischen Luftbildern. Marceau et al. (1990) und Sali und Wolfson (1992) benutzen Texturmasse zur Klassifikation von verschiedenen Bodenbedeckungsklassen in panchromatischen SPOT-2 Satellitendaten. Soh und Tsatsoulis (1999) klassieren Meereistypen in ERS-1 SAR Satellitendaten. Pesaresi (2000) klassiert Siedlungsgebiete in IRS-1C Satellitendaten, Karathanassi et al. (2000) in SPOT-2 Daten. Caridade et al. (2008) evaluieren den Beitrag von Texturmassen zur Klassifikation verschiedener Bodenbedeckungstypen in digitalisierten schwarz-weiss Luftbildern. Delenne et al. (2008) klassieren Rebberge aufgrund der Richtungsabhängigkeit der Textur in Fotografien, aufgenommen aus einem Ultraleichtflugzeug. In all diesen Untersuchungen hat der Einbezug von Texturinformation das Klassifikationsresultat markant verbessert. Dies unterstreicht das Potential der Texturinformationen für die Analyse von Fernerkundungsdaten.

6.3. Charakteristische Textur von Lawinenkegeln

Lawinenkegel weisen eine raue Oberfläche auf, was zu unregelmässigem Schattenwurf und deshalb zu einer inhomogenen Textur führt. Eine frisch verschneite Oberfläche dagegen zeichnet sich lokal meist durch eine ausgesprochen glatte Oberflächenstruktur aus, was eine homogene Textur entstehen lässt. Der Unterschied zwischen der Textur von Lawinenkegeln und der Textur der angrenzenden, ungestörten Schneedecke kann für die Erkennung und Klassifikation von Lawinenereignissen genutzt werden. Die Textur eines Lawinenkegels, wie sie in

räumlich hoch aufgelöst, optischen Fernerkundungsdaten sichtbar ist, wird von verschiedenen Faktoren beeinflusst die nachfolgend aufgelistet werden:

a) *Dimension und Form der Ablagerungselemente*

Ablagerungselemente auf Lawinenkegeln können Durchmesser von einigen Zentimetern bis zu mehr als einem Meter erreichen. Die Form kann dabei von beinahe rund bis zu plattenförmig variieren. Zusätzlich kann die Form und Grösse der Ablagerungselemente auch innerhalb eines Lawinenkegels verschieden sein. Die Form, Grösse und Verteilung der Ablagerungselemente ist hauptsächlich abhängig von der Fliessgeschwindigkeit der Lawine, vom Gehalt an freiem Wasser in der Schneedecke, von der Schneetemperatur und der Oberflächenrauigkeit sowie von der Form der Gleitfläche (Jomelli und Bertran, 2001; McClung und Schaerer, 2006). Abbildung 39 zeigt Beispiele von Lawinenkegeln mit unterschiedlich ausgeprägten Ablagerungselementen.

b) *Veränderung der Schneedecke*

Die Schneedecke ist stets im Wandel. Sobald eine Lawine niedergegangen ist, beginnt sich die Form und Grösse der Ablagerungselemente unter dem Einfluss von Wind, Niederschlag, Temperatur und Luftfeuchtigkeit zu verändern (McClung und Schaerer, 2006). Die Zwischenräume der rauen Oberfläche werden aufgefüllt, die hervorstehenden Kanten abgeschliffen. Wird ein Lawinenkegel überschneit, ist die Textur oft gar nicht mehr sichtbar. Mit zunehmendem Alter und durch den Einfluss von Wind bilden sich auch auf der ungestörten Schneedecke raue Oberflächen, welche der Textur von Lawinenkegeln sehr ähnlich sein können (Abbildung 40).

c) *Beleuchtungssituation*

Aufgrund der grossen Höhenunterschiede im Alpinen Hochgebirge und dem flachen Einstrahlungswinkel der Sonne im Winter liegen zahlreiche Hänge im Schlagschatten. Obwohl die direkte Sonneneinstrahlung in diesen Gebieten fehlt, können Lawinenkegel von Auge von der ungestörten Schneedecke unterschieden werden (Abbildung 41). Umliegende, direkt bestrahlte Hänge reflektieren einen Grossteil der Strahlung im visuellen und nahinfraroten Bereich des elektromagnetischen Spektrums und beleuchten dadurch die Schattenhänge. Da diese Strahlung gerichtet ist, bildet sich auch an der Oberfläche von Lawinenkegeln im Schatten ein Mosaik aus hellen und dunklen Flächen. Abhängig vom Einstrahlungswinkel, dem Beobachtungswinkel, der Exposition und der Hangneigung variieren der Schattenwurf der Oberfläche und dadurch die Textur des Lawinenkegels.

d) *Fremdmaterialanteil*

Grosse Tallawinen können ganze Waldabschnitte, Gebäude, Schutt und Geröll mit zu Tal reissen. Diese Materialien werden auf dem Kegel abgelagert und beeinflussen dessen Erscheinungsbild massgeblich. Bei älteren Lawinenkegeln konzentriert sich das Fremdmaterial an der Oberfläche und kann den Schnee vollständig bedecken. Reine Oberflächenlawinen oberhalb der Baumgrenze enthalten dagegen nur selten Fremdmaterialien. Die Textur von Lawinenablagerungen kann durch den Fremdmaterialgehalt massgeblich verändert werden (Abbildung 42). So reduziert beispielsweise Schutt den Kontrast zwischen den beleuchteten und beschatteten Flächen auf dem Kegel stark. Baumstämme dagegen werfen zusätzliche, richtungsabhängige Schatten auf den Kegel.

e) *Bildmassstab*

Die Wahrnehmung von Texturen ist im hohen Mass abhängig vom Bildmassstab (Haralick, 1979; Pickett, 1970), welcher bei Fernerkundungsdaten durch die räumliche Auflösung bestimmt wird. Lawinenkegel weisen in abbildenden, optischen Fernerkundungsdaten mit einer sehr hohen räumlichen Auflösung (0.1 bis 1 m) eine raue Oberflächentextur auf. Mit schlechter werdender räumlicher Auflösung wird diese Textur allmählich verwischt (Abbildung 43).



Abbildung 39 Unterschiedliche Texturen von Lawinenkegeln in den ADS40 Daten hervorgerufen durch die Form und Dimension der Ablagerungselemente. A) kleine, rundliche Blöcke, B) grosse, rundliche Blöcke, C) schollenförmige Blöcke. Der Massstab der Bilder ist annähernd identisch

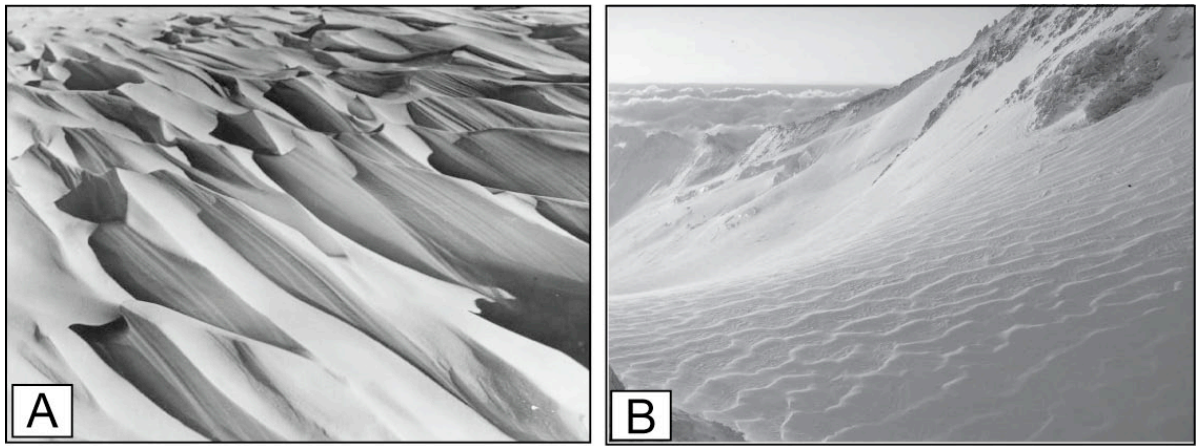


Abbildung 40 Beispiele für grossmasstäbliche Texturen von Schnee. A) vom Wind geformte Sastrugi, B) durch Wind und den Abstrahlungsunterschied zwischen Tag und Nacht entstandene Formen. (Bild A: www.jamd.com, Bild B: SLF, R. Meister)

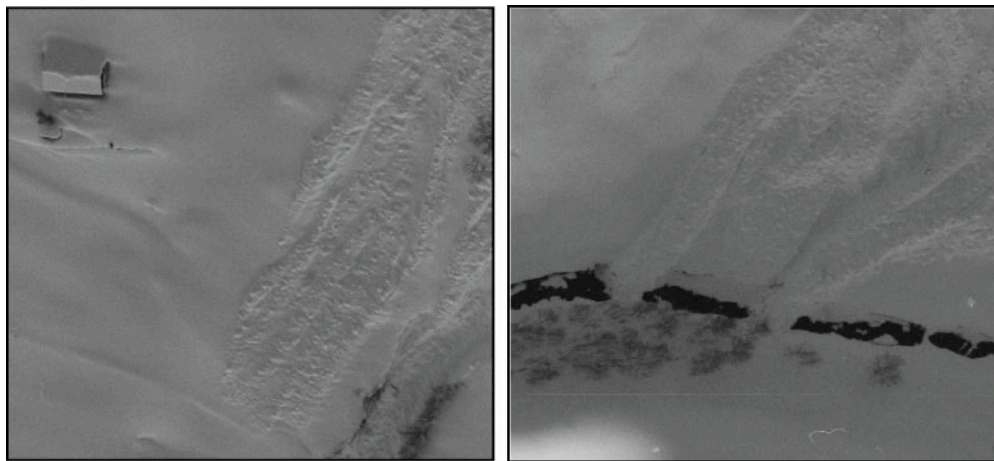


Abbildung 41 Beispiele für Lawinenkegel im Schlagschatten von Gebirgszügen in RC30 Luftbildern



Abbildung 42 Lawinenkegel mit unterschiedlichem Fremdmaterialanteil im Raum Davos (Fotografien A. Hüni)

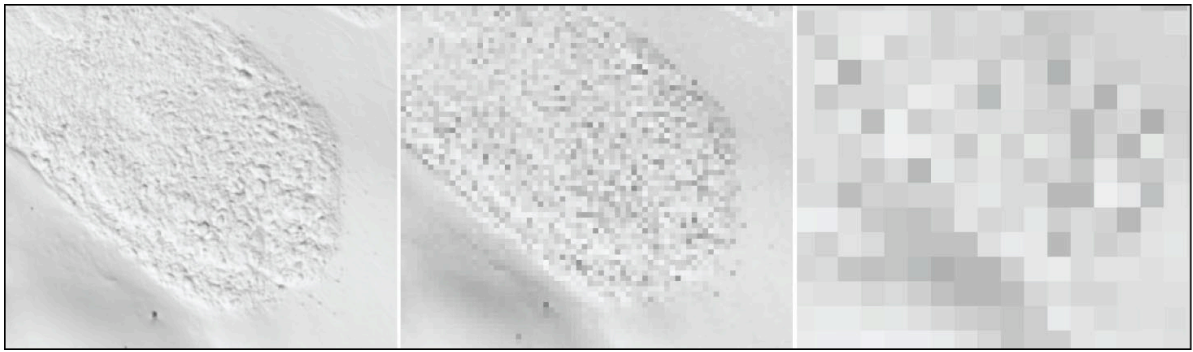


Abbildung 43 Veränderung der Textur eines Lawinengegels abhängig vom Bildmassstab. Links: Pixelgröße 0,2 m, Mitte: Pixelgröße 1 m, Rechts: Pixelgröße 5 m

Tamura et al. (1978) haben zur Einordnung von Texturen ein qualitatives Beurteilungsschema entwickelt und dieses auf verschiedene Objekttexturen angewendet. Abbildung 44 zeigt die Einordnung der Textur von Lawinenablagerungen und der ungestörten Schneedecke in dieses Schema.

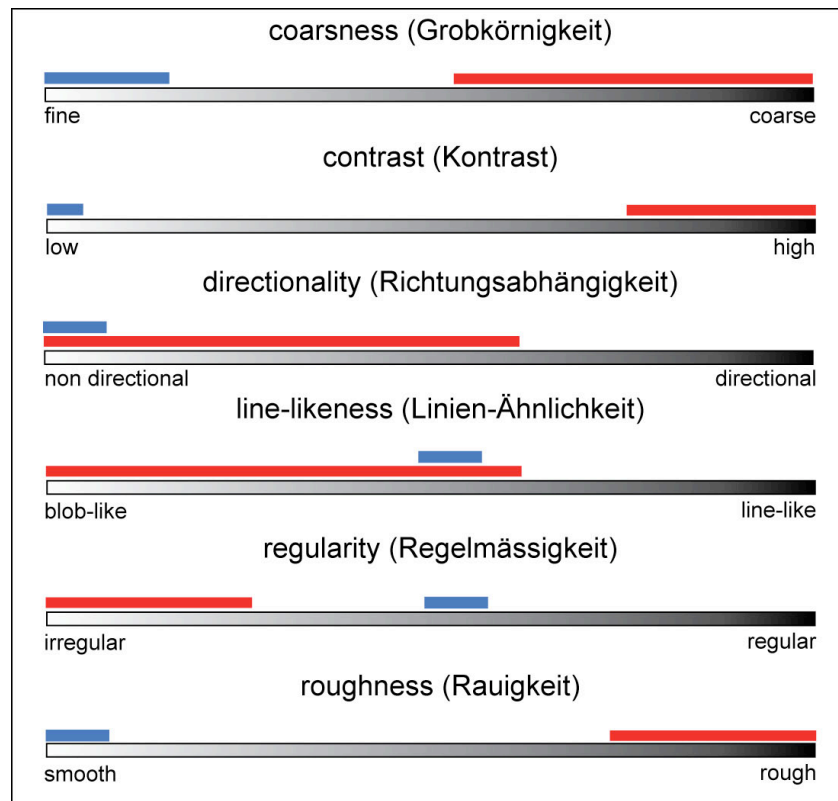


Abbildung 44 Einordnung der Texturen von Lawinengegeln (rot) und ungestörter Schneedecke (blau) in das qualitative System nach Tamura et al. (1978) basierend auf der Einschätzung des Autors

Die qualitative Einordnung der Lawinengegeltextrur zeigt, dass sich vor allem die Kategorien Grobkörnigkeit, Kontrast, Regelmässigkeit und Rauigkeit gut für die Unterscheidung von Lawinengegeln (AVAL) und ungestörter Schneedecke (UNDI) eignen. In vier von sechs Kategorien lassen sich die zwei Klassen eindeutig voneinander trennen. Dies deutet darauf hin, dass Texturmasse ein grosses Potential für die Erkennung und Kartierung von Lawinenablagerungen aufweisen.

6.4. Hypothese

Folgende Hypothese steht im Zentrum dieses Kapitels:

Lawinenablagerungen (AVAL) und die ungestörte Schneedecke (UNDI) können in abbildenden, räumlich hoch aufgelösten optischen Fernerkundungsdaten mit statistischen Texturmassen eindeutig unterschieden werden.

Zur Verifikation dieser Hypothese müssen zusätzlich folgende Fragen beantwortet werden:

- Welche Texturmasse sind am besten geeignet?
- Welches sind die optimalen Parametereinstellungen für die einzelnen Masse?
- Welche räumliche Auflösung der Bilddaten kann verwendet werden?
- Reichen Texturmasse allein für eine zufriedenstellende Erkennung und Klassifikation von Lawinenkegeln aus?

6.5. Datengrundlage

Weil Fernerkundungsdaten bevorzugt in der schneefreien Periode des Jahres aufgenommen werden, existieren nur wenige räumlich hoch aufgelöste Fernerkundungsdatensätze, welche Lawinenablagerungen abbilden.

Im Lawinenwinter 1999 haben das Bundesamt für Landestopographie (swisstopo), die Schweizer-Luftwaffe und die Firma Swissphoto AG grosse Gebiete der Schweizer Alpen mit Luftbildkameras befliegen (Budmiger und Budmiger, 2000). Für die Analyse der Textureigenschaften von Lawinenablagerungen wurden in dieser Arbeit digitalisierte RC30 schwarz-weiss Luftbilder der swisstopo verwendet. Diese Luftbilder enthalten unterschiedliche Typen von Lawinenablagerungen und sind von hoher Qualität. Die verfügbaren Bilder wurden gesichtet und aufgrund der Bildqualität und den enthaltenen Lawinentypen ausgewählt. Dabei wurde auf drei Testregionen fokussiert: Evolène VS, Obergoms VS und Elm GL (Abbildung 45). Details über die verwendeten Luftbilder sind in Tabelle 11, Informationen über die untersuchten Lawinen in Tabelle 12 aufgelistet.

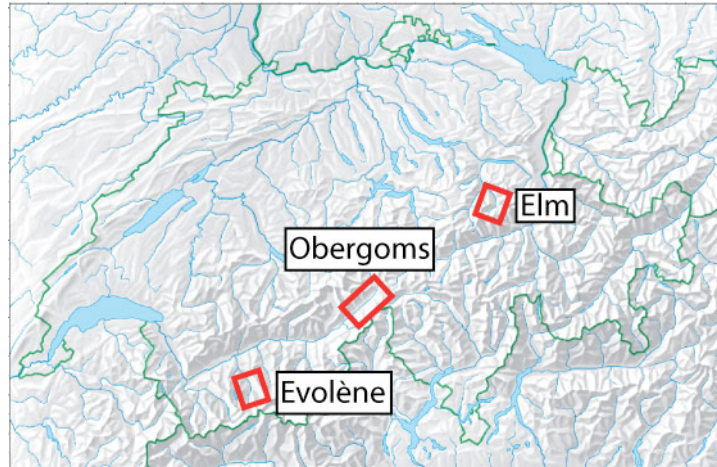


Abbildung 45 Lokalisierung der Untersuchungsgebiete. Reproduziert mit Bewilligung von swisstopo (BA091356)

Tabelle 11 Aufnahme- und Scanparameter der verwendeten RC30 Luftbilder (Mitteilung der swisstopo)

Region	Nummer	Datum	Aufnahmezeit	Bildmassstab	Pixelgrösse bei 1814 dpi
Goms	5837	26. 02. 1999	13:48:28	ca. 1 : 13'700	ca. 18 cm
Goms	5845	26. 02. 1999	13:49:42	ca. 1 : 14'300	ca. 20 cm
Goms	5902	26. 02. 1999	14:03:21	ca. 1 : 14'200	ca. 20 cm
Goms	5914	26. 02. 1999	14:05:02	ca. 1 : 13'900	ca. 19 cm
Goms	6071	26. 02. 1999	14:46:37	ca. 1 : 10'200	ca. 14 cm
Goms	6079	26. 02. 1999	14:47:34	ca. 1 : 9'500	ca. 13 cm
Elm	5431	26. 02. 1999	10:39:19	ca. 1 : 8'700	ca. 12 cm
Elm	5433	26. 02. 1999	10:39:36	ca. 1 : 9'000	ca. 13 cm
Elm	5435	26. 02. 1999	10:39:52	ca. 1 : 9'900	ca. 14 cm
Elm	5445	26. 02. 1999	10:45:52	ca. 1 : 11'600	ca. 16 cm
Elm	5452	26. 02. 1999	10:46:49	ca. 1 : 10'800	ca. 15 cm
Evolène	2852	27. 02. 1999	?	ca. 1 : 11'300	ca. 15 cm
Evolène	2854	27. 02. 1999	?	ca. 1 : 11'100	ca. 15 cm
Evolène	2856	27. 02. 1999	?	ca. 1 : 11'000	ca. 15 cm
Goms	5234	25. 02. 1999	15:36:38	ca. 1 : 23'600	ca. 34 cm
Goms	5238	25. 02. 1999	15:37:34	ca. 1 : 23'300	ca. 33 cm
Goms	5242	25. 02. 1999	15:38:21	ca. 1 : 23'300	ca. 33 cm
Goms	5402	26. 02. 1999	11:05:15	ca. 1 : 22'600	ca. 32 cm
Goms	5406	26. 02. 1999	11:05:52	ca. 1 : 22'700	ca. 32 cm
Goms	5410	26. 02. 1999	11:06:29	ca. 1 : 22'750	ca. 32 cm

Aufgrund der unterschiedlichen räumlichen Auflösung der Luftbilder ist die Vergleichbarkeit der Texturanalysen nicht gewährleistet. Deshalb wurden die Bilder nach ihrer räumlichen Auflösung in zwei Gruppen eingeteilt. Eine erste Gruppe bilden die Luftbilder mit einer Pixelgrösse von 13 bis 20 cm. In der zweiten Gruppe wurden die Bilder mit einer räumlichen Auflösung von 32 bis 34 cm zusammengefasst. Die räumliche Auflösung der Bilddaten wurde durch manuelle Messung im Luftbild bestimmt. Die Angaben gelten für das Gebiet der analysier-

ten Lawinenkegel. Die räumliche Auflösung anderer Gebiete im Bild variiert aufgrund der ausgeprägten Topographie stark.

Tabelle 12 Detailinformationen zu den untersuchten Lawinenkegeln (Wiesinger und Adams, 2008)

Typ (Kap. 6.6)	Region	Name	Niedergang	Luftbild	Beschreibung / Schäden
A	Goms Gerschinen VS	Trütlawine	22. 02. 1999	5845 6071	Neunmal an verschiedenen Daten abgegangen, verschüttet die Strasse, zerstört Ställe und ein Wohnhaus, fordert ein Todesopfer.
A	Evolène VS	Avalanche du Bréquet	21. 02. 1999	2854 2856	Teil einer riesigen Lawine mit drei verschiedenen Ablageungsgebieten welche insgesamt 12 Todesopfer fordert und 52 Gebäude zerstört.
A	Evolène VS	Avalanche des Maures	21. 02. 1999	2854	Teil derselben riesigen Lawine, fordert drei Todesopfer.
A	Evolène VS	La Giette	vermutlich 21. 02. 1999	2856	Keine Schäden, nicht im SLF Winterbericht (Wiesinger und Adams, 2008) verzeichnet.
B	Elm GL	Chüeboden-lawine	21. 02. 1999	5445	Waldschaden entlang der Runse, verschüttet Strasse, verfehlt Wohnhäuser nur knapp.
B	Elm GL	Chleblawine	21. 02. 1999	5452	Diverse Waldschäden
B	Elm GL	Büellawine	21. 02. 1999	5452	Verschüttet die Waffenplatzstrasse bis zu 12 Meter hoch, diverse Waldschäden.
B	Goms Gerschinen VS	Wilerbach-lawine	21. 02. 1999	5845	Verschüttet zwei Wohnhäuser, Hauptstrasse, Bahnlinie sowie eine Stromleitung. Die betroffene Zone wurde vor dem Niedergang evakuiert.
B	Goms Reckingen VS	Twäre-Lawine	21. 02. 1999	5902	Zerstört acht Gebäude und beschädigt drei weitere. Schäden an Wald und Kulturland.
B	Goms Reckingen VS	Löwwibach-Lawine	21. 02. 1999	5902	Wald und Flurschäden, verschüttet Strassen.
C	Elm GL	Hintere Schloss-lawine	20. 02. 1999	5431	Zerstört einen Stall und ein Haus, verursacht Waldschäden und verschüttet die Strasse.
C	Elm GL	Alpli-Lawine	vermutlich 20. 02. 1999	5433	keine Schäden gemeldet
C	Elm GL	Vordere Schloss-lawine	21. 02. 1999	5433 5435	Verschüttet die Hauptstrasse ca. 2 Meter hoch, beschädigt Skilift und fünf Wohnhäuser, füllt den Bachlauf der Sernft auf.

6.5.1. Skalierung der Luftbilddaten

Um den Einfluss des Bildmassstabes auf die Texturmasse zu überprüfen, werden die digitalisierten Luftbilder auf räumliche Auflösungen von 0.5 und 1 m skaliert. Die Skalierung wird mit einer $\text{sinc}(x/a)$ Funktion (vgl. Kapitel 7.4.3) durchgeführt, weil damit die *spatial response function* eines abbildenden, optischen Sensors gut simuliert wird (Hore et al., 2007). Einen Überblick über die Problematik der Skalierung von Fernerkundungsdaten gibt Barnsley et al. (1997). Verschiedene satellitengestützte optische Sensoren verfügen heute über ein panchromatisches Band mit einer räumlichen Auflösung von einem Meter oder besser. Beispiele solcher Satelliten sind QuickBird, IKONOS, Eros B, Cartosat-2, Kompsat-2, WorldView-1. Weitere werden in naher Zukunft folgen (z.B. Pleiades, WorldView-2) (PREVIEW, 2008). Solche Sensoren liefern potentiell Datenmaterial zur Erkennung und Kartierung von Lawinen.

6.6. Methode

Um die Trennbarkeit von Lawinenkegeln gegenüber der ungestörten Schneedecke anhand von statistischen Texturanalysen zu quantifizieren, werden in den Luftbildern manuell Stichproben für die Klasse *Lawinenkegel* (AVAL) und die Klasse *ungestörte Schneedecke* (UNDI) gesetzt. Je grösser ein Lawinenkegel ist, desto mehr Stichproben werden genommen, es werden aber im Minimum 75 Stichproben pro Klasse und Bild gesetzt. Bei den Stichproben der ungestörten Schneedecke wird darauf geachtet, dass sie ungefähr dieselbe Hangneigung und Exposition haben wie der Kegel, um allfällige Beleuchtungseffekte zu minimieren. Eine automatisierte Beleuchtungskorrektur kann nicht durchgeführt werden, weil kein Oberflächenmodell mit genügender räumlicher Auflösung verfügbar ist. Die Stichproben auf dem Lawinenkegel werden in möglichst gleichmässigen Abständen gesetzt. Überbelichtete oder stark beschattete Regionen werden aber ausgeschlossen. Es werden keine Stichproben nahe an den Rändern und in unmittelbarer Nähe von anderen Objekten gesetzt, da sonst die Resultate bei Analysen mit grossen Filterboxen verfälscht würden. Abbildung 46 zeigt ein Beispiel für die Auswahl der Stichproben in einem Luftbild.

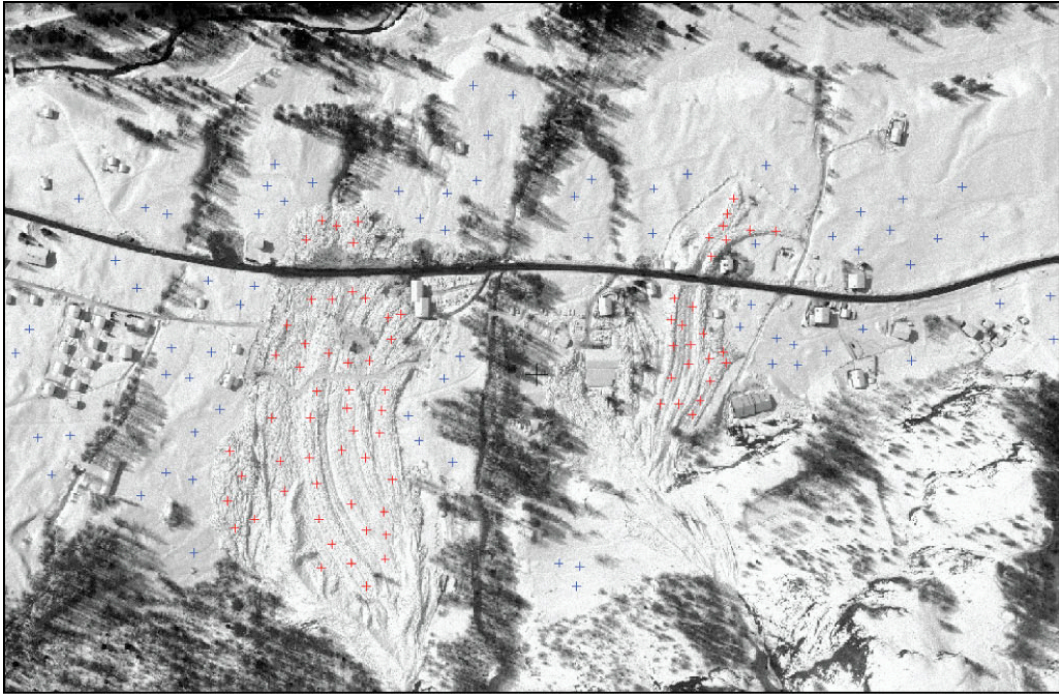


Abbildung 46 Beispiel für die manuelle Verteilung der Stichproben. Klasse AVAL (rot) und Klasse UNDI (blau), Ausschnitt Luftbild Nummer 2854 Evolène VS.

In den verfügbaren Bilddaten können grundsätzlich drei morphologisch unterschiedliche Typen von Lawinenkegeln unterschieden werden:

- Typ A: Frische Lawinenkegel, welche nicht überschneit sind, nicht im Schatten liegen und grosse Ablagerungselemente aufweisen.
- Typ B: Überschneite Lawinenkegel, welche nicht im Schatten liegen und grosse Ablagerungselemente aufweisen.
- Typ C: Überschneite Lawinenkegel vom Typ A und B, welche im Schatten liegen.

Abbildung 47 zeigt jeweils ein Beispiel jeder Gruppe. Diese drei Typen von Lawinenkegeln werden in dieser Arbeit untersucht. Weitere Typen von Lawinenkegeln können aufgrund der verfügbaren Daten nicht untersucht werden. Da die Morphologie grosser Lawinenkegel in den meisten Fällen sehr ähnlich ist, liegt die Vermutung nahe, dass auch ihre Textureigenschaften vergleichbar sind. Diese Vermutung muss aber noch anhand von weiteren Datensätzen überprüft werden.

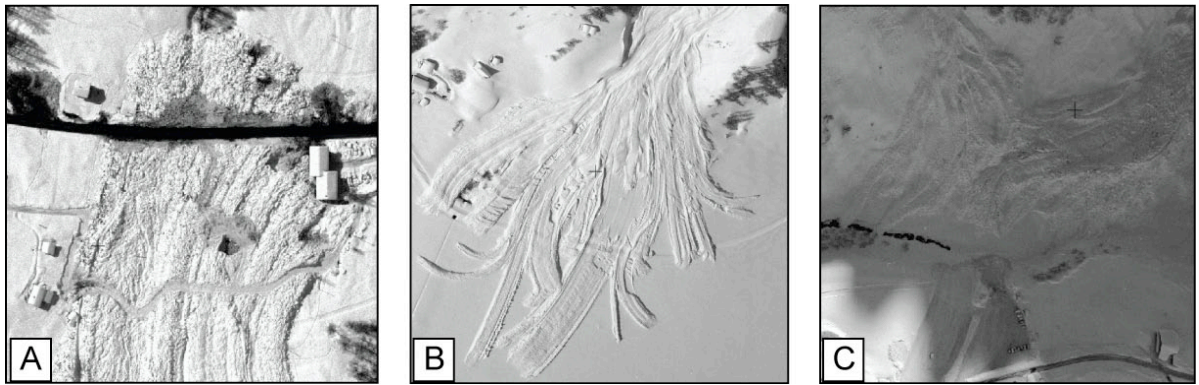


Abbildung 47 Beispiele für die drei in den Luftbilddaten vorkommende Kegeltypen aus der Region Evolène (A), Goms (B) und Elm (C).

Insgesamt werden für jede Klasse von jedem Typ ca. 300 Stichproben gesetzt, was einer summierten Stichprobenanzahl von ca. 1800 Stichproben entspricht. Diese Stichproben werden anhand der in Kapitel 6.2 beschriebenen Methoden analysiert.

6.6.1. Mass für die Unterscheidbarkeit der Klassen

Damit die Ergebnisse der Texturanalyse interpretiert und verglichen werden können, ist ein sinnvolles Mass für die Unterscheidbarkeit der beiden Klassen AVAL und UNDI entscheidend. Innerhalb eines Texturmasses kann die Trennbarkeit über den Mittelwert und die Standardabweichung dargestellt und abgeschätzt werden. Da die Texturmasse aber sehr unterschiedliche Skalen aufweisen, müssen die Werte normalisiert werden. Nur so wird ein Vergleich zwischen den Massen möglich. In dieser Arbeit wird dazu die Rangsummenstatistik nach Wilcoxon verwendet (Fahrmeir et al., 2007; Mehrotra et al., 1977; Wilcoxon, 1945). Dieses nichtparametrische Verfahren basiert ausschliesslich auf der Reihenfolge in welcher die Stichproben angeordnet sind. Alle Stichproben werden dabei nach ihrer Messgrösse in eine Rangfolge gebracht, wobei der kleinste Wert den Rang eins erhält. Existieren unterschiedliche Stichproben mit demselben Wert, wird der Mittelwert der betroffenen Ränge gebildet. Danach werden die Rangwerte einer Klasse addiert. Kommen zwei Stichproben aus derselben Verteilung und sind somit nicht voneinander trennbar, so sind die Rangsummen beider Klassen ungefähr gleich gross. Ist das Gegenteil der Fall, so unterscheiden sich die Rangsummen deutlich. Die Berechnung des Trennungsmasses erfolgt nach Formel (25):

$$W = \frac{\left| R_N - \frac{1}{2} R_{tot} \right|}{\frac{1}{4} R_{tot}} \quad (25)$$

wobei:

W = Mass für die Trennbarkeit von zwei Klassen

R_N = Rangsumme der Klasse N

R_{tot} = Total aller möglicher Rangsummen

Überlappen sich zwei Stichproben komplett, ergibt die Formel (25) den Wert null, da die Rangsumme einer Klasse genau der Hälfte der Total möglichen Rangsummen entspricht. Sind die zwei Klassen vollständig trennbar, das heisst, es kommen keine Überlappungen vor, ergibt die Formel (25) den Wert eins. Diese Methode wird aus folgenden Gründen ausgewählt:

- a) Die grundlegende Frage nach dem Potential für die Trennbarkeit der zwei Klassen wird klar beantwortet.
- b) Das Mass ist relativ einfach zu interpretieren. Ergibt die Formel (25) den Wert eins, steht dies für eine hundertprozentige Chance, dass eine Stichprobe anhand des untersuchten Masses der richtigen Klasse zugeordnet werden kann. Ergibt die Formel (25) den Wert null, steht die Chance bei 50% und man könnte ebenso gut eine Münze werfen.
- c) Durch die hierarchische Ordnung der Stichproben findet eine Normalisierung statt.
- d) Das Mass ist nicht anfällig für Ausreisser innerhalb der Stichprobe.
- e) Es müssen keine Annahmen über die Verteilung der Stichproben getroffen werden.
- f) Die Berechnung ist relativ einfach automatisierbar.

6.7. Resultate und Interpretation

In diesem Kapitel werden die Resultate der Texturanalyse in Form von verschiedenen Graphiken präsentiert. Die Resultate werden anschliessend interpretiert und diskutiert.

6.7.1. Statistik erster Ordnung

6.7.1.1. Bestimmung der optimalen Parametereinstellungen

Die Masse, abgeleitet aus der Histogrammstatistik, können ausschliesslich durch die Kantenlänge der Filterbox beeinflusst werden. Abbildung 48 zeigt exemplarisch die Reaktion von zwei Massen auf die Veränderung der Filterboxdimension und die Trennbarkeitsanalyse für die zwei Klassen AVAL und UNDI, abhängig von der Filterboxdimension.

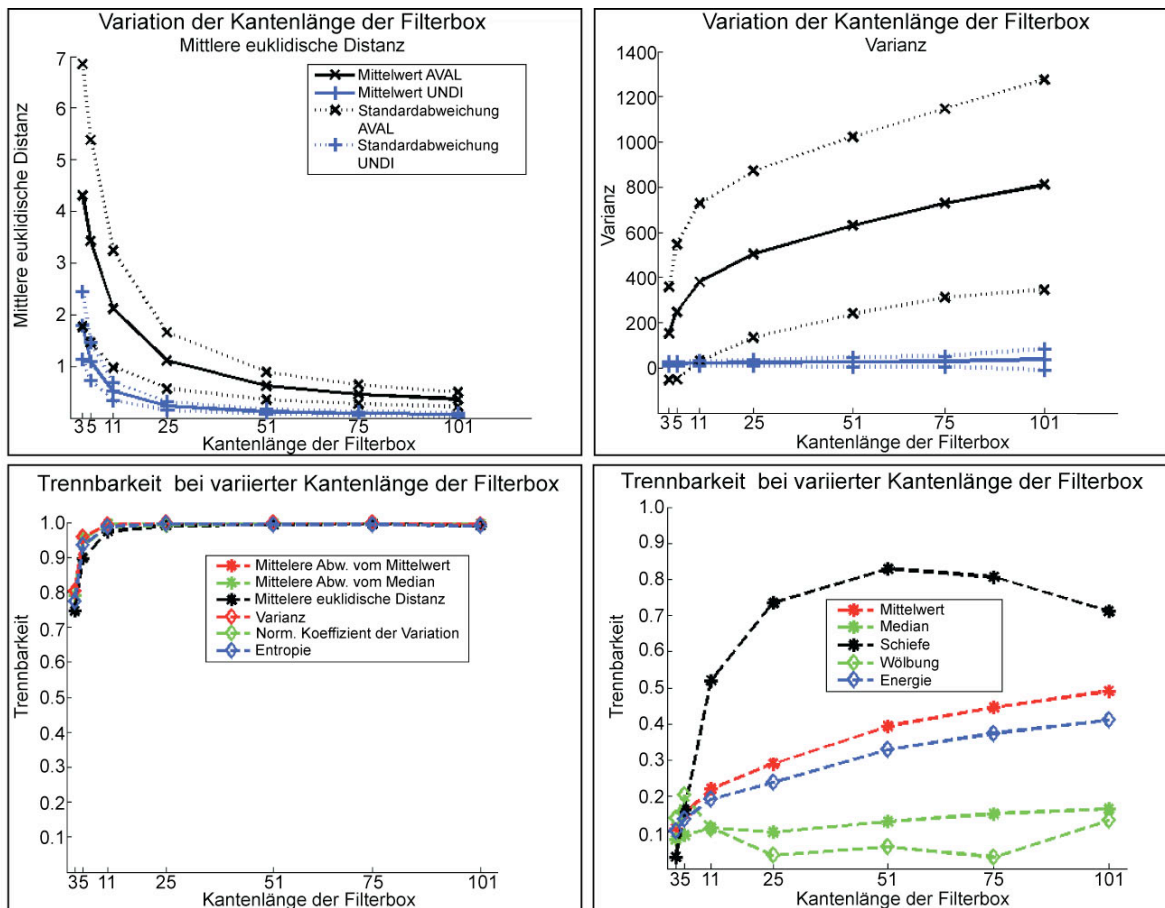


Abbildung 48 Variation der Filterboxgröße, exemplarisch für zwei Texturmasse erster Ordnung und Trennbarkeitsanalyse für die Texturmasse abhängig von der Filterboxgröße

Die einzelnen Texturmasse reagieren unterschiedlich auf die Veränderung der Kantenlänge der Filterbox. In der ersten Gruppe der Masse (Abbildung 48 unten links) steigt die Qualität der Trennbarkeit bis zu einer Filterboxgröße von 25 mal 25 Pixeln steil an und bleibt danach konstant hoch. In der zweiten Gruppe der Masse (Abbildung 48 unten rechts) ist die Variation des Einflusses der Filterboxdimension auf die Trennbarkeit deutlich grösser. Allerdings erreichen diese Masse mit keiner Filterboxdimension eine befriedigende Trennbarkeit der Klassen AVAL und UNDI.

6.7.1.2. Texturmasse

Die Texturmasse, welche in der vorliegenden Untersuchung verwendet werden, sind in Kapitel 6.2.1 beschrieben. Nachdem im vorangehenden Kapitel die optimale Einstellung der Filterboxgröße abgeschätzt wurde, werden nun die Texturmasse auf ihre Eignung für die Trennung von Lawinenkegeln vom angrenzenden, ungestörten Schnee geprüft. Abbildung 49 zeigt die Ergebnisse dieser Analyse.

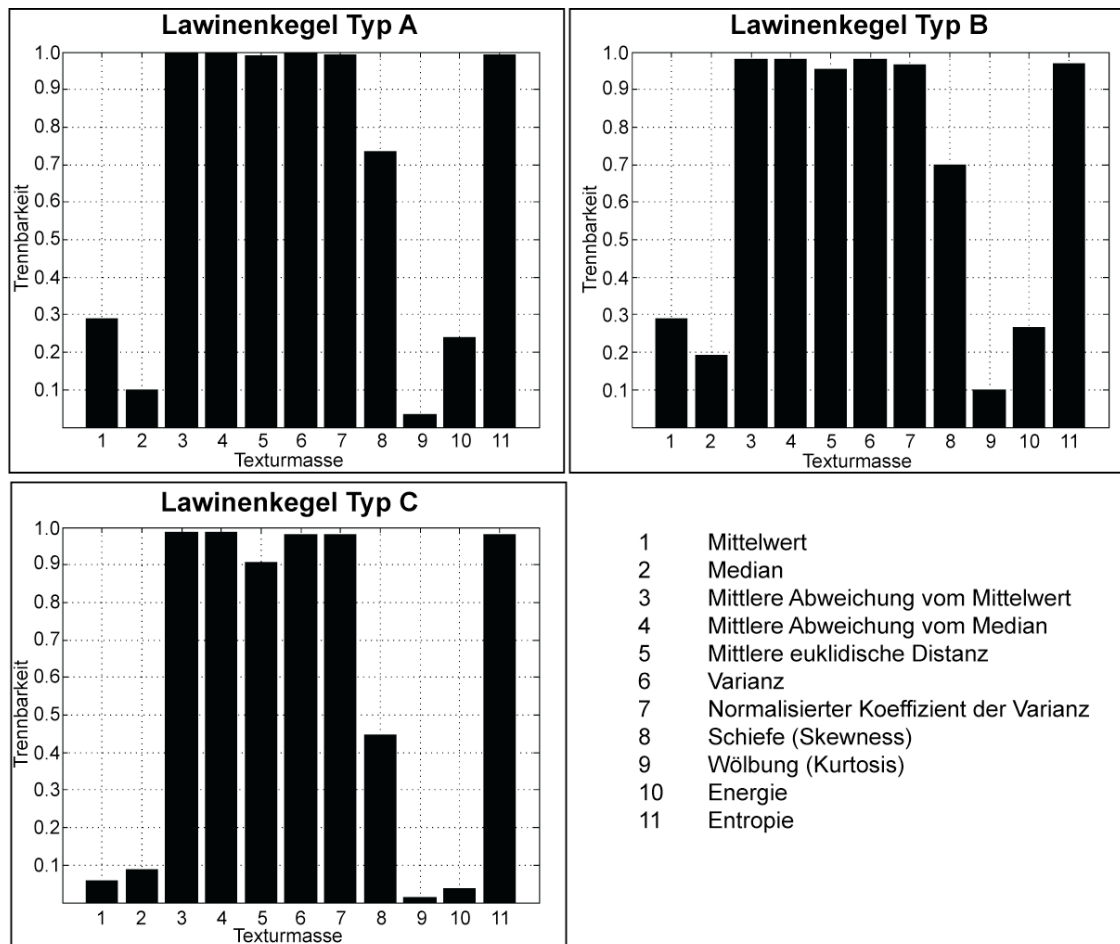


Abbildung 49 Trennbarkeitsanalyse für die untersuchten Texturmasse erster Ordnung für nicht überschneite Lawinenkegel (Typ A), überschneite Lawinenkegel (Typ B) und Kegel im Schatten (Typ C), Kantenlänge der Filterbox 25 Pixel.

Bereits einfache, histogramm-basierte Texturmasse eignen sich gut für die Unterscheidung zwischen Lawinenablagerungen und der angrenzenden, ungestörten Schneedecke. Diese Aussage ist für alle drei Typen von Lawinenkegeltexturen sowie für die skalierten Daten gültig, wobei bei den nicht überschneiten Lawinenkegeln eine geringfügig bessere Trennbarkeit resultiert als bei den überschneiten oder beschatteten Kegeln (Abbildung 49). Allerdings bringt die Kombination dieser Texturmasse keine Verbesserung der Trennbarkeit, da die Masse entweder stark miteinander korrelieren (Tabelle 13) oder nur ein geringes Potential zur Trennung der zwei Klassen zeigen. Aus diesem Grund wird die Varianz (respektive Standardabweichung) als Vertreter der histogramm-basierten Masse vorgeschlagen, da dieses Mass in verschiedenen Softwarepaketen implementiert ist (Definiens, 2007; PCI, 2005). Zudem ist es einfach interpretierbar und benötigt wenig Prozessierungszeit. Abbildung 50 zeigt die Darstellung der Standardabweichung für einen frischen, nicht überschneiten Lawinenkegel und das angrenzende Gebiet. Ein älterer, stark überschneiter und abgetragener Kegel derselben Lawine, welche zu einem früheren Zeitpunkt niedergegangen ist, grenzt unmittelbar an den frischen Kegel.

Tabelle 13 Korrelationskoeffizienten für die Texturmasse der Statistik erster Ordnung für die Klasse UNDI. Die Buchstaben beziehen sich auf die Masse in Tabelle 10 auf Seite 70.

	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k
a	1	0,994	-0,38	-0,38	-0,34	-0,35	-0,44	-0,08	0,002	0,997	0,401
b		1	-0,31	-0,33	-0,28	-0,29	-0,39	-0,15	0,019	0,991	0,354
c			1	0,999	0,957	0,976	0,988	-0,38	0,015	-0,36	-0,92
d				1	0,955	0,976	0,989	-0,37	0,006	-0,36	-0,93
e					1	0,945	0,942	-0,40	0,048	-0,32	-0,88
f						1	0,969	-0,31	-0,02	-0,32	-0,95
g							1	-0,34	0,034	-0,42	-0,95
h								1	-0,20	-0,07	0,185
i									1	-0,00	0,057
j										1	0,365
k											1

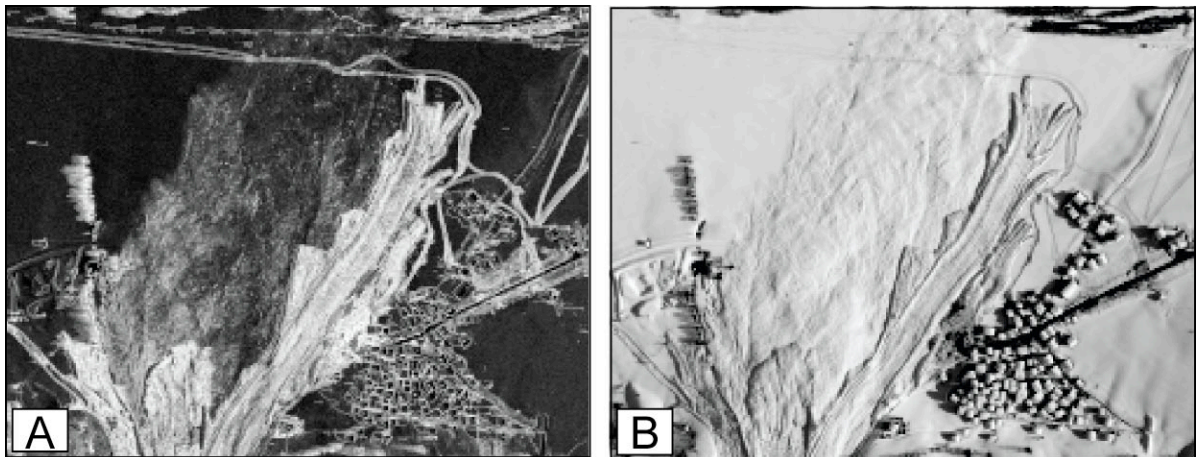


Abbildung 50 Darstellung der Werte für die Standardabweichung (A) und das Original Luftbild zum Vergleich (B) bei einer Kantenlänge der Filterbox von 25 x 25 Pixeln. Helle Gebiete in A bezeichnen hohe Werte, dunkle Gebiete tiefe Werte

Dieses Beispiel zeigt deutlich, dass sich der Lawinenkegel vom Typ A zwar sehr gut von der ungestörten Schneedecke unterscheiden lässt, verschiedene andere Oberflächen aber ebenfalls eine hohe Standardabweichung aufweisen. Insbesondere Gebiete in der Umgebung von Bäumen und Gebäuden sowie schneebedeckte Strassen und Wege weisen ähnliche Werte auf wie der Lawinenkegel. Deshalb genügt die Standardabweichung alleine nicht zur präzisen Erkennung von Lawinenkegeln. Weitere Parameter müssen einbezogen werden, um dieses Ziel zu erreichen. Zudem zeigt Abbildung 50 auch deutlich, dass der alte, überschneite Lawinenkegel nur noch stellenweise eine höhere Standardabweichung aufweist als die ungestörte Schneedecke und deshalb nicht mehr richtig klassiert werden kann, obwohl er von Auge teilweise noch deutlich sichtbar ist.

Die überschneiten Lawinenkegel (Typ B) und solche im Schatten (Typ C) lassen sich mit histogramm-basierten Massen erwartungsgemäss etwas schlechter von der angrenzenden Schneedecke unterscheiden (Abbildung 49). In den beschatte-

ten Gebieten treten üblicherweise geringere Variationen der Grauwerte auf, was zu einer verminderten Erkennbarkeit von Objekten führt. Weil aber Schnee den sichtbaren Teil des elektromagnetischen Spektrums stark reflektiert (Warren, 1982), kommt von schneebedeckten Oberflächen mehr Energie zum Sensor als bei den meisten anderen Materialien. Dies führt dazu, dass auch in den Schattengebieten noch viele Details innerhalb der Schneeoberfläche sichtbar sind und auch Lawinenkegeltexturen erfasst werden können.

6.7.2. Statistik zweiter Ordnung

6.7.2.1. Bestimmung der optimalen Parametereinstellungen

Für die Bestimmung der optimalen Einstellung der Parameter werden die Stichproben der Lawinenkegel vom Typ A verwendet, da diese die charakteristischen Merkmale von Lawinenablagerungstexturen in ausgeprägter Form aufweisen. Die Parametereinstellungen werden auf diejenigen Texturmasse optimiert, welche ein grosses Potential zur Trennung der Klassen AVAL und UNDI zeigen (vgl. Kap. 6.7.2.2). Masse, welche sich nicht zur Trennung dieser Klassen eignen, werden nicht weiter berücksichtigt.

a) Kantenlänge der Filterbox

Die GLCM ergibt nur dann aussagekräftige Werte, wenn die charakteristische Textur eines Objektes von der Filterbox möglichst vollständig erfasst wird. Um eine repräsentative Abdeckung der möglichen Kantenlängen der quadratischen Filterbox zu erreichen, werden Kantenlängen von 3, 5, 11, 25, 51, 75, 101 Pixeln untersucht. Dies entspricht bei einer räumlichen Auflösung von ca. 15 cm Filterboxen mit einer Kantenlänge von 0,45 bis 15,15 Meter. Abbildung 51 zeigt die Resultate dieser Boxgrössen-Analyse.

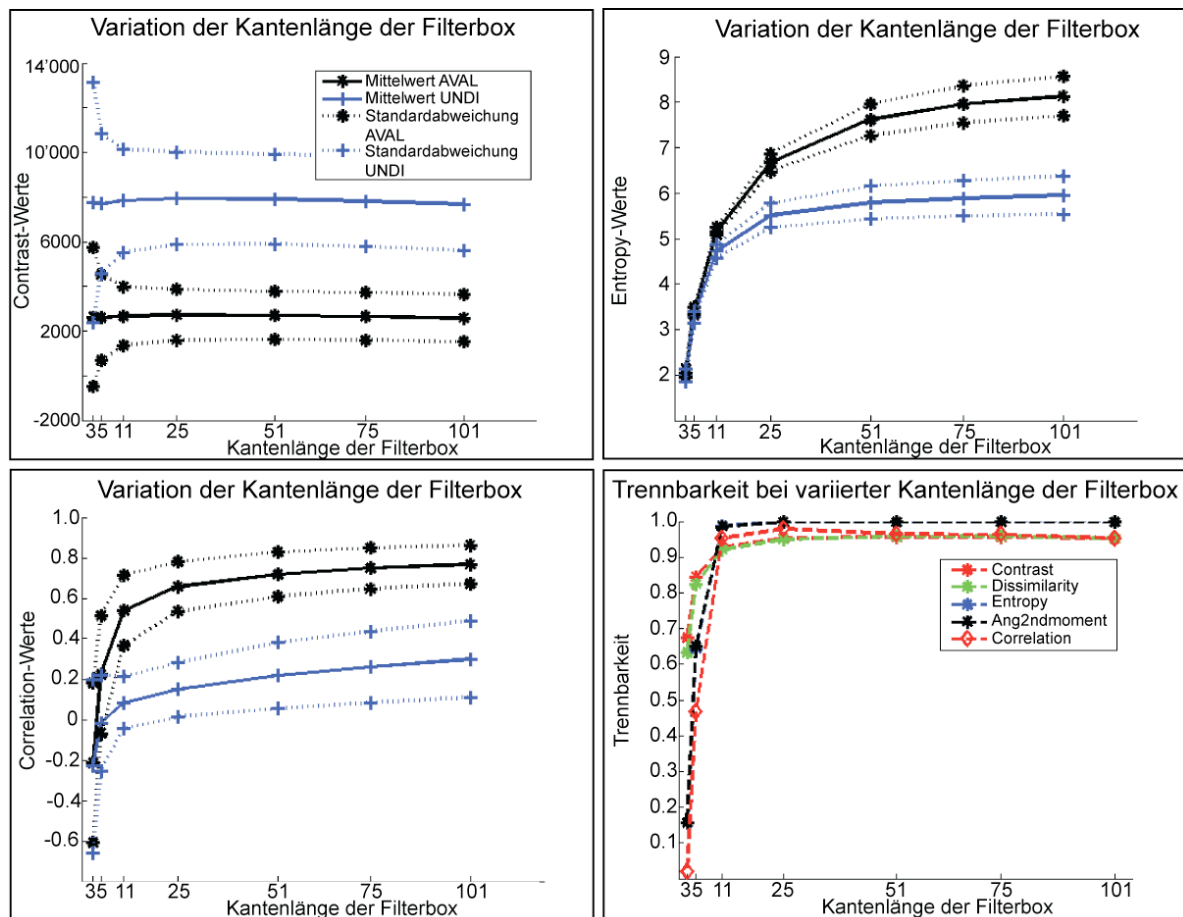


Abbildung 51 Variation der Filterboxgröße exemplarisch für drei Texturmasse (*Contrast*, *Entropy* und *Correlation*) zur Bestimmung des optimalen Wertebereichs und Trennbarkeitsanalyse, abhängig von der Filterboxgröße für die Texturmasse mit hohem Trennbarkeitspotential

Die Unterscheidbarkeit der beiden Klassen nimmt mit zunehmender Kantenlänge der Filterbox tendenziell zu (Abbildung 51). Allerdings steigt dabei die Gefahr, dass kleinräumige Texturen nicht mehr erfasst werden und angrenzende Objekte das Resultat verfälschen. Ab einer Kantenlänge von 25 Pixeln ist ein deutliches Abflachen der Distanz zwischen den Texturwerten der beiden Stichprobenklassen zu beobachten. Bereits ab einer Kantenlänge von 11 Pixeln ist eine nahezu vollständige Trennung der zwei Klassen möglich. Vergleichbare Beobachtungen wurden auch bei früheren Untersuchungen gemacht (Caridade et al., 2008; Hodgson, 1998; Karathanassi et al., 2000; Marceau et al., 1990; Pesaresi, 2000; Soh und Tsatsoulis, 1999; Su et al., 2008). Aus diesen Resultaten wird gefolgert, dass für die untersuchten Daten und Klassen eine Grösse von 25 Pixeln (entspricht bei 15 cm räumlicher Auflösung 3,75 Metern) einen guten Kompromiss zwischen Unterscheidbarkeit, Verfälschung der Resultate durch angrenzende Objekte und Rechenaufwand darstellt. Deshalb wird für die Analyse der Texturmasse, wenn nicht anders ausgewiesen, die Filterboxgröße 25 Pixel verwendet. Diese Einstellung hat sich auch für die Analyse der skalierten Daten als optimal erwiesen. Zwar umfasst die Filterbox bei diesen Daten deutlich grössere Flächen, für eine aussagekräftige Erfassung der Textur muss aber eine Mindestanzahl Pixel innerhalb der Filterbox vorhanden sein, um brauchbare Resultate zu erhalten.

b) Richtung

Die Berechnung der Texturmasse anhand von GLCM ist richtungsabhängig. Zur Feststellung der optimalen Richtungseinstellung werden die vier Hauptrichtungen (0° , 45° , 90° , 135°) sowie der Mittelwert aller Hauptrichtungen getestet. Abbildung 52 zeigt die Ergebnisse der Richtungsanalyse.

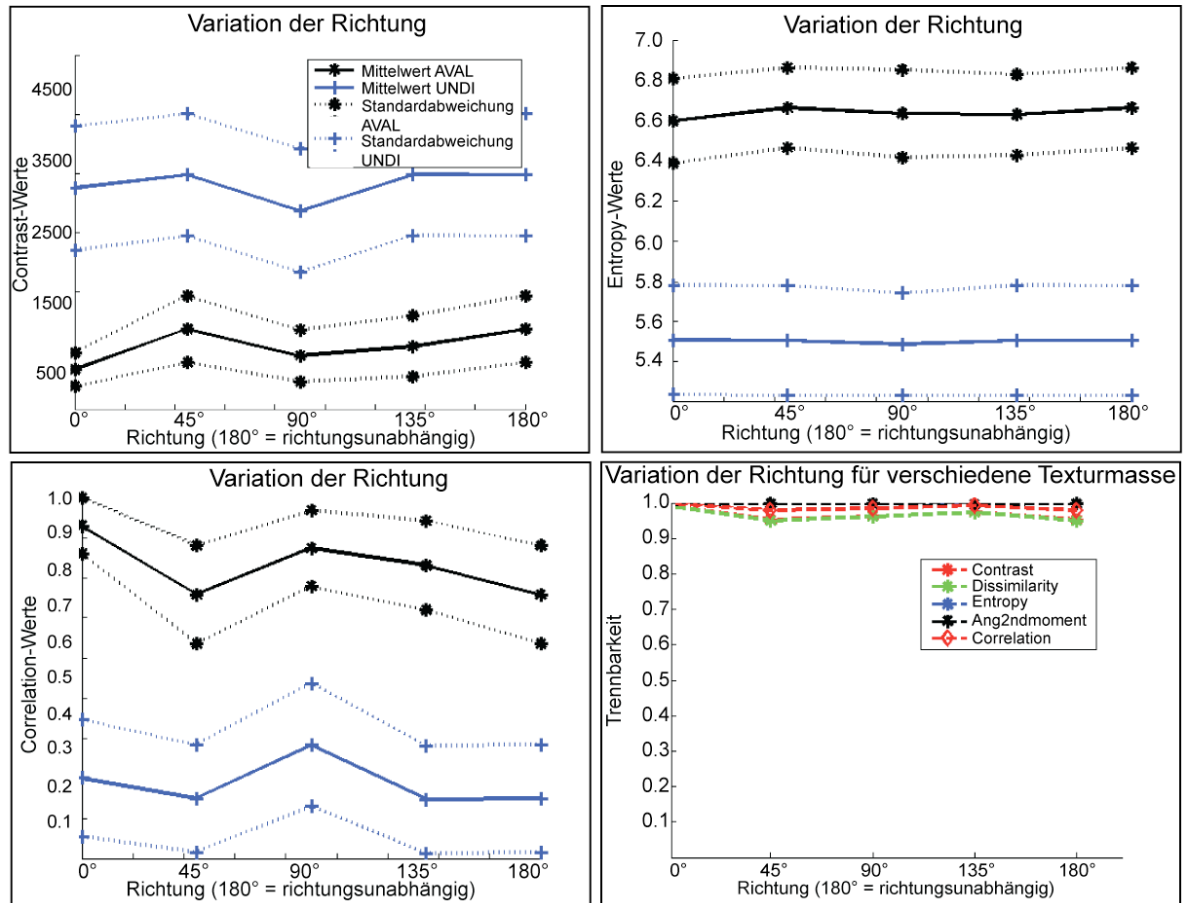


Abbildung 52 Variation der Richtung exemplarisch für drei Texturmasse (*Contrast*, *Entropy* und *Correlation*) zur Bestimmung des optimalen Wertebereichs und Trennbarkeitsanalyse der Stichprobenklassen abhängig von der Richtung.

Abbildung 52 zeigt, dass sich die Werte bei variierender Richtung nur geringfügig ändern. Das Mass *Correlation* ergibt zwar etwas höhere Werte bei einer Richtung von 90° , allerdings gilt dies sowohl für die Klasse AVAL wie auch für die Klasse UNDI, was vermutlich auf die Beleuchtung zurückzuführen ist. Daraus ergibt sich keine verbesserte Unterscheidbarkeit zwischen Lawinenkegeln und ungestörter Schneedecke. Insbesondere anthropogene Objekte weisen oft richtungsabhängige Texturen auf (Delenne et al., 2008; Karathanassi et al., 2000). Lawinenkegel dagegen besitzen meist zufällig angeordnete, richtungsunabhängige Texturen. Nur wenn sehr deutliche Fliesstrukturen auftreten, können schwach richtungsabhängige Texturen erwartet werden. Ist eine Richtung der Textur vorhanden, so ist diese vor allem abhängig von der Fließrichtung der Lawine und damit von der Exposition des Geländes. Die Exposition und Hangneigung kann aber innerhalb eines Untersuchungsgebietes stark variieren. Aufgrund dieser Beobachtungen wird für die weiterführenden Texturanalysen in dieser Arbeit der Mittelwert der Haupt-

richtungen, also ein richtungsunabhängiges Mass verwendet. Dies hat auch den Vorteil, dass die unterschiedlichen Expositionen im Gelände diesbezüglich vernachlässigt werden können.

c) Distanz

Die optimale Distanz zwischen benachbarten Grauwerten kann je nach den Eigenschaften der untersuchten Textur variieren. Allerdings wird in der Literatur in den meisten Fällen die unmittelbare Nachbarschaft der Pixel untersucht. Die wenigen Experimente, welche auch grössere Distanzen verwenden kommen zum Schluss, dass die Ergebnisse mit grösser werdendem Abstand zwischen den Pixeln tendenziell schlechter werden (Chen et al., 1989; Dikshit, 1996; Soh und Tsatsoulis, 1999). In der vorliegenden Untersuchung wird die Distanz in Pixelschritten gemessen. Für die diagonalen Richtungen 45° und 135° bedeutet dies eine höhere reale Distanz als für die Richtungen 0° und 90° . Zur Verifikation dieser Aussage werden Distanzen von einem bis 11 Pixel getestet. Grössere Distanzvektoren machen keinen Sinn, da bei einer Filterboxgrösse von 25 Pixeln bereits die Hälfte der Filterboxdimension erreicht ist. Abbildung 53 zeigt die Ergebnisse der Distanzanalyse.

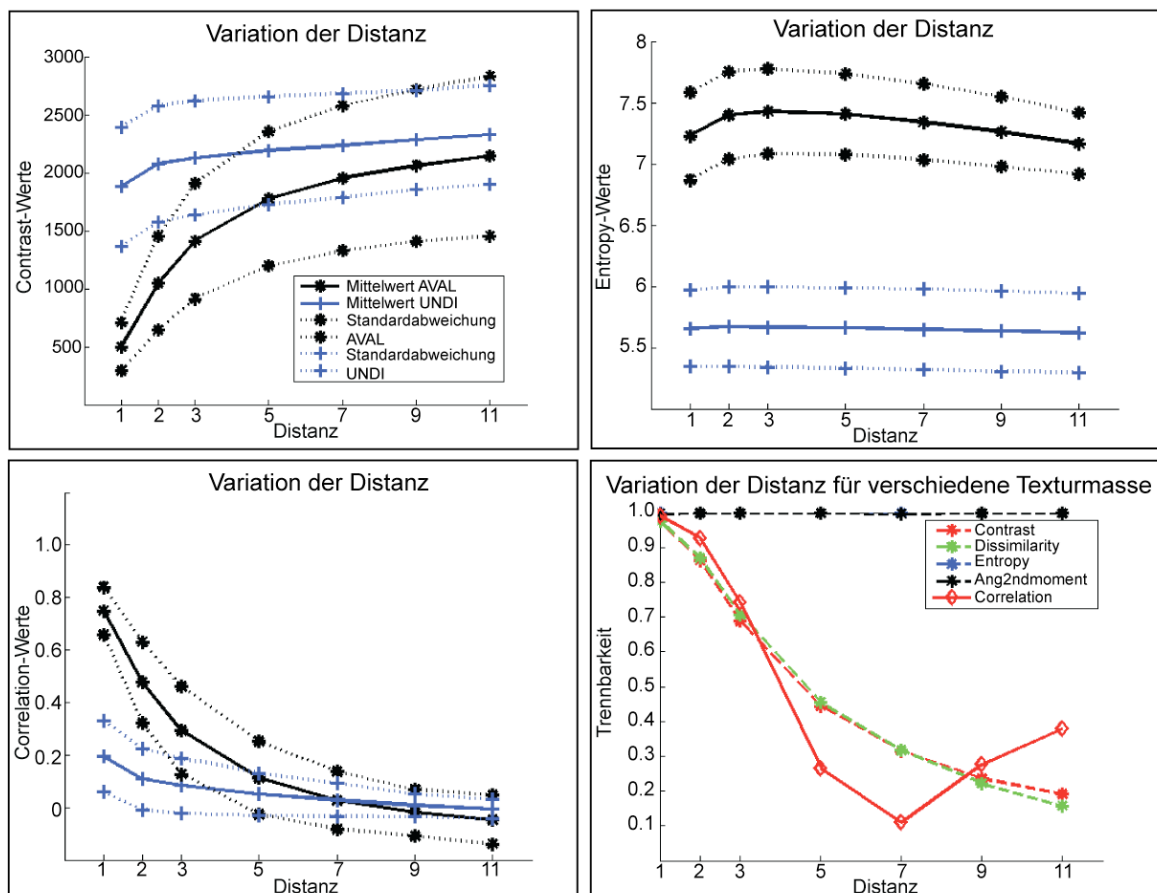


Abbildung 53 Variation der Distanz exemplarisch für drei Texturmasse (*Contrast*, *Entropy* und *Correlation*) zur Bestimmung des optimalen Wertebereiches und Trennbarkeitsanalyse der Stichprobenklassen, abhängig von der Distanz

Die Texturmasse reagieren sehr unterschiedlich auf die Variation der Distanz zwischen den Pixeln. Während die Unterscheidbarkeit der Klassen AVAL und UNDI

bei den Massen *Entropy* und *Angular 2nd Moment* konstant bleibt, wird sie bei den Massen *Contrast*, *Dissimilarity* und *Correlation* mit zunehmender Distanz zwischen den Pixeln deutlich schlechter (Abbildung 53). Diese Beobachtungen decken sich mit den Aussagen, welche in den wenigen Untersuchungen in der Literatur gemacht werden, die den Parameter Distanz untersucht haben (Chen et al., 1989; Soh und Tsatsoulis, 1999). Aufgrund dieser Resultate wird für die weitere Analyse der Textur in dieser Arbeit eine Distanz von einem Pixeln verwendet.

6.7.2.2. Texturmasse

Die verwendeten Texturmasse sind in Kapitel 6.2.2.3 beschrieben. Sie werden in diesem Kapitel auf ihre Eignung für die Trennung von Lawinenkegeln von der angrenzenden, ungestörten Schneedecke geprüft. Die dazu verwendeten Parameter sind in Tabelle 14 aufgelistet. Die Abbildungen 54 bis 56 zeigen die Ergebnisse der Analyse der untersuchten Masse für die drei in dieser Arbeit verwendeten Typen von Lawinenkegeltexturen (Kap. 6.6).

Tabelle 14 Parameterwerte, wie sie für die nachfolgenden Untersuchungen verwendet werden.

Kantenlänge der quadratischen Filterbox	25 Pixel
Richtung	richtungsunabhängig (Mittelwert der Hauptrichtungen)
Distanz	1 Pixel

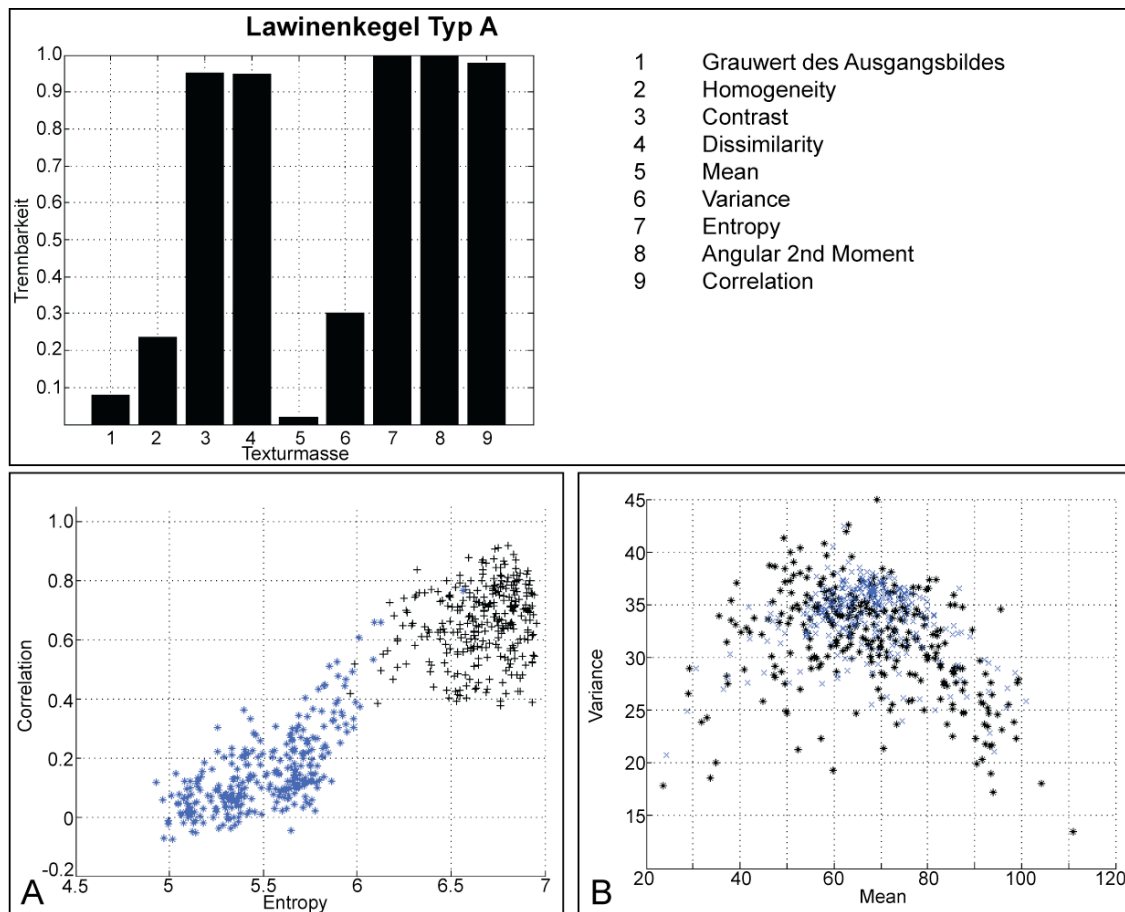


Abbildung 54 Trennbarkeitsanalyse für die untersuchten GLCM-Texturmasse für nicht überschneitete Lawinenkegel. Verteilung der Stichproben der Klassen AVAL (schwarz) und UNDI (blau) im zweidimensionalen Merkmalsraum für Masse mit einem hohen Trennbarkeitspotential (A) und mit einem geringen Trennbarkeitspotential (B)

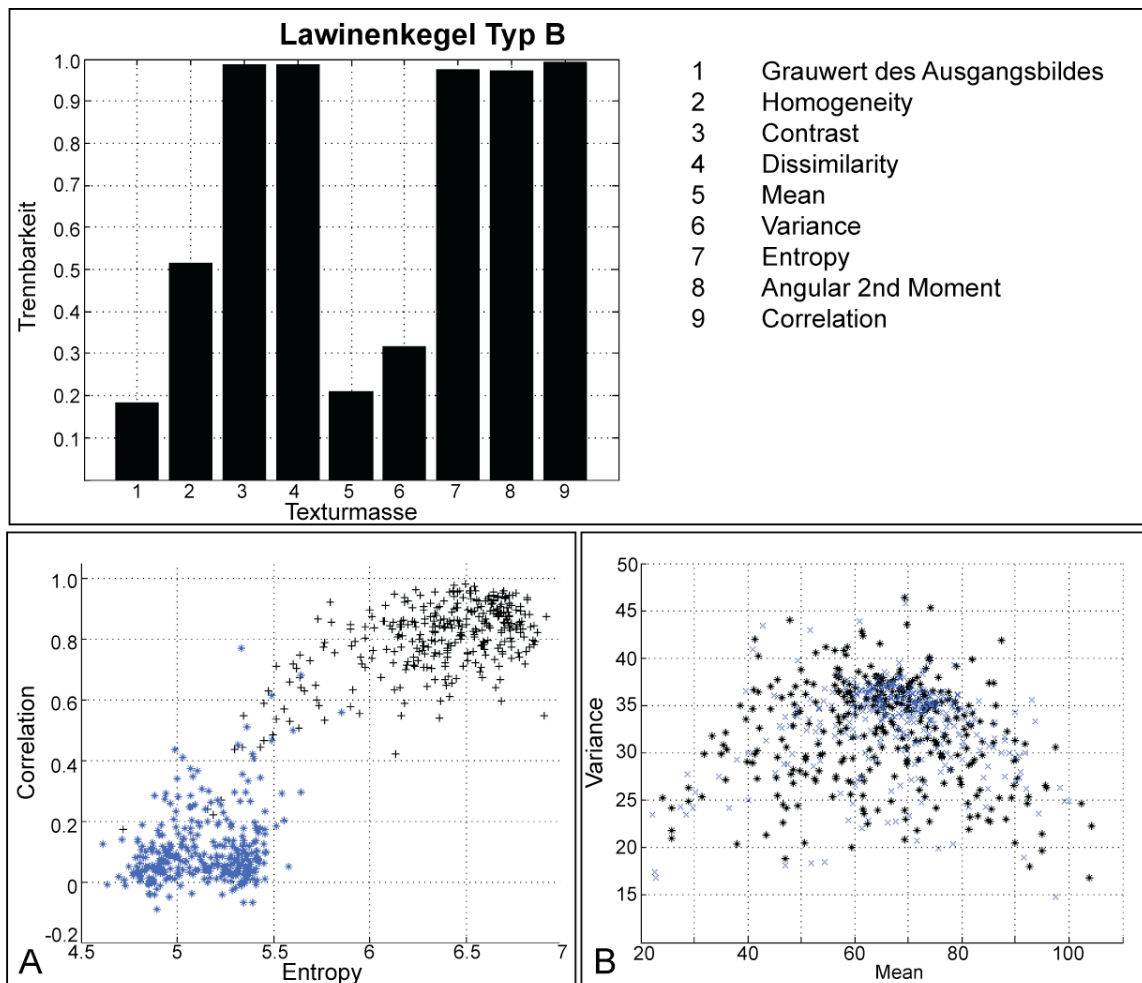


Abbildung 55 Trennbarkeitsanalyse für die untersuchten GLCM-Texturmasse für überschneite Lawinenkegel. Verteilung der Stichproben der Klassen AVAL (schwarz) und UNDI (blau) im zweidimensionalen Merkmalsraum für Masse mit einem hohen Trennbarkeitspotential (A) und mit geringem Trennbarkeitspotential (B)

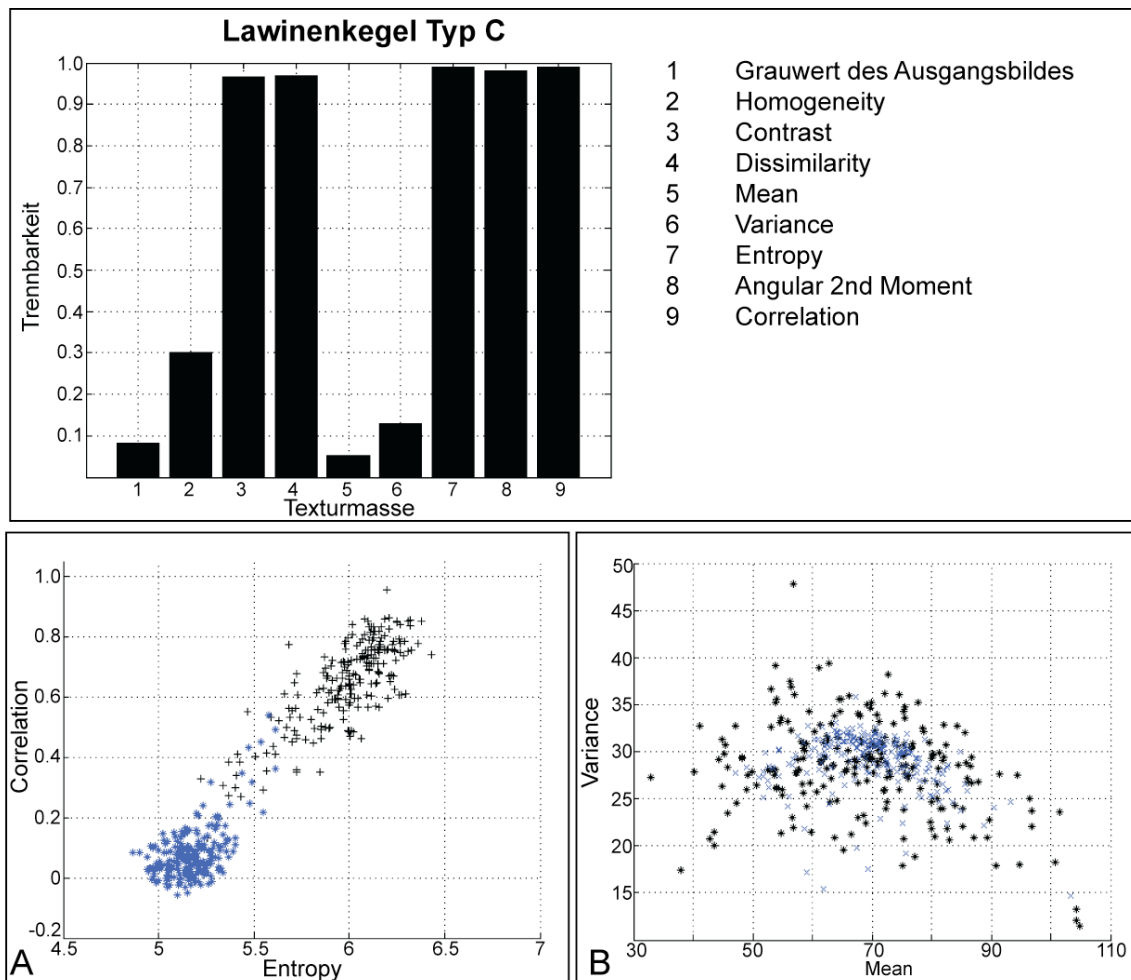


Abbildung 56 Trennbarkeitsanalyse für die untersuchten GLCM-Texturmasse für Lawinenkegel im Schatten. Verteilung der Stichproben der Klassen AVAL (schwarz) und UNDI (blau) im zweidimensionalen Merkmalsraum für Masse mit einem hohen Trennbarkeitspotential (A) und mit einem geringen Trennbarkeitspotential (B)

Neben den Luftbildern mit einer räumlichen Auflösung von ca. 15 cm sind auch Bilder, welche in grösserer Höhe über Grund aufgenommen wurden, verfügbar (vgl. Tabelle 11 S. 81). Diese Bilder haben einen kleineren Massstab mit einer räumlichen Auflösung von etwas mehr als 30 cm. Auch die so gewonnenen Daten werden mittels Stichproben einer Texturanalyse unterzogen. Die Filterboxgrösse wird aber auf den Wert 11 festgelegt, da dies, kombiniert mit der räumlichen Auflösung von ca. 30 cm, ungefähr 3,5 Metern entspricht und deshalb direkt mit der Kombination von 15 cm räumlicher Auflösung und 25 Pixel Filterboxgrösse der anderen Luftbilder verglichen werden kann. Die Bilder enthalten nicht genügend Kegel vom Typ A, deshalb werden auch Stichproben von Ablagerungen des Typs B verwendet.

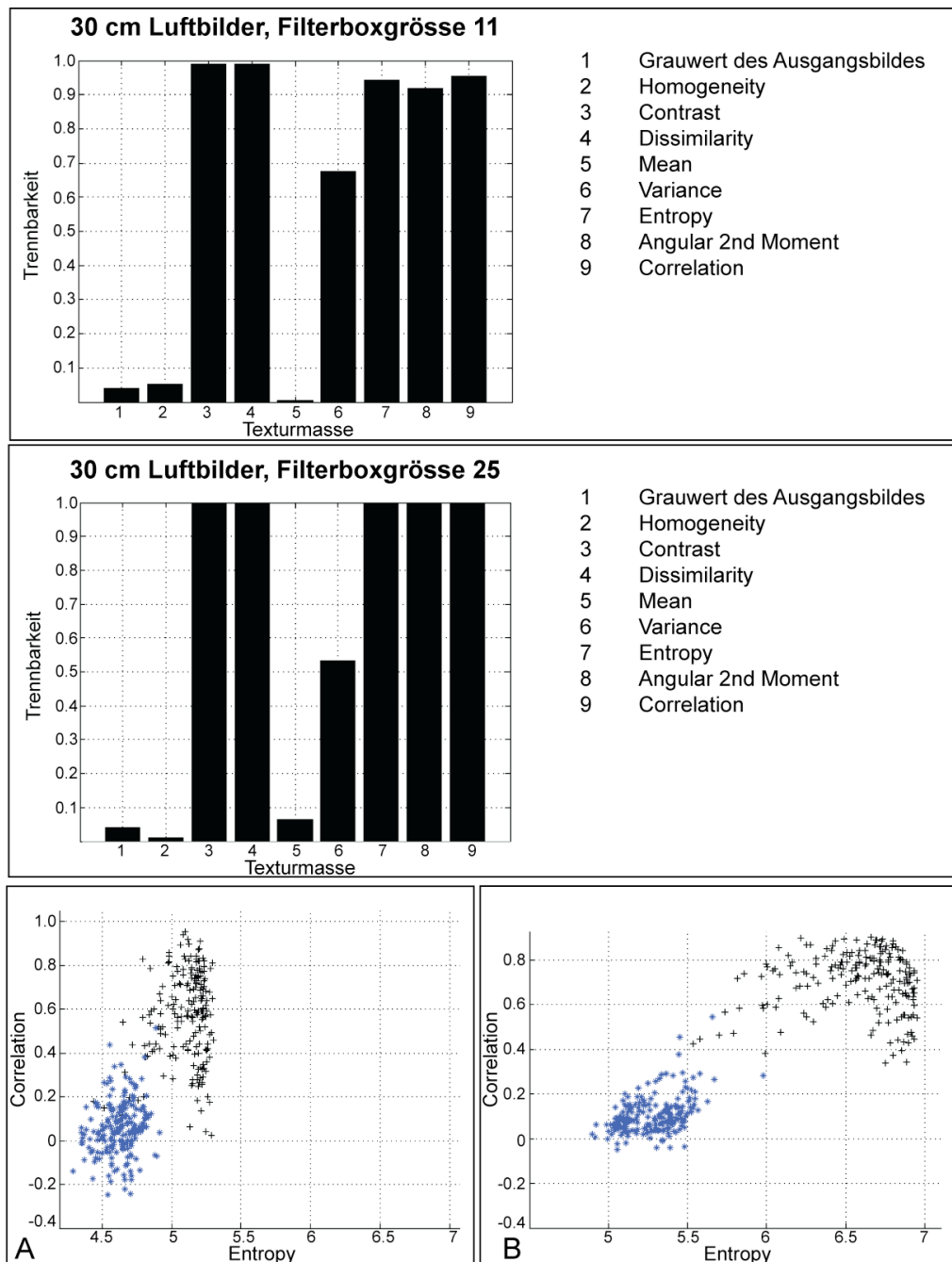


Abbildung 57 Trennbarkeitsanalyse für die untersuchten GLCM-Texturmasse auf den 30cm Luftbildern für die Filterboxgrößen 11 und 25 Pixel. Zweidimensionaler Merkmalsraum für Masse mit einem hohen Trennbarkeitspotential für die Kantenlänge der Filterbox von 11 (A) und 25 Pixel (B)

Die Abbildungen 54 bis 56 zeigen deutlich, dass sich nicht alle Texturmasse für die Trennung der Klassen AVAL und UNID eignen. Während die Masse *Homogeneity*, *Mean* und *Variance* für alle Typen von Lawinenkegeln kaum brauchbar sind, zeigen die Masse *Contrast*, *Dissimilarity*, *Entropy*, *Angular 2nd Moment* und *Correlation* sehr gute Resultate. Allerdings korrelieren die beiden Massspaare *Contrast/Dissimilarity* sowie *Entropy/Angular 2nd Moment* sehr stark miteinander, was eine Kombination dieser Parameter für die Klassifikation von Lawinenablagerungen überflüssig macht (0). Zwischen den verschiedenen Lawinenkegeltypen zeigen sich nur geringfügige Unterschiede. Bei den Lawinenkegeln des Typs A erzielen

die Masse *Entropy/Angular 2nd Moment* die besten Resultate mit einem Wert von nahezu eins, was einer minimalen Überlappung der Stichproben entspricht. Bei den Typen B und C zeigt das Mass *Correlation* die besten Ergebnisse. Die Masse *Contrast/Dissimilarity* sind geringfügig besser als beim Typ A. Allerdings bewegen sich diese Unterschiede in einer sehr kleinen Spannweite. Tabelle 15 listet alle untersuchten Texturparameter mit dem zugehörigen Trennbarkeitspotential auf und zeigt auf, welche Masse geeignet sind. Die Texturmasse nach Haralick zeichnen ein deutlich differenzierteres Bild der Oberflächentexturen als die Masse berechnet aus der Statistik erster Ordnung (vgl. Abbildung 50). Abbildung 58 zeigt die Klassifikation der Schneeoberflächenrauigkeit basierend auf dem Mass *Entropy*.

Korrelationskoeffizienten für die Texturmasse nach Haralick für die Klasse UNDI. Die Abkürzungen beziehen sich auf die Bezeichnungen der Texturmasse in Kapitel 6.2.2.3
Seite 73

	HOM	CON	DIS	MEA	VAR	ENT	ASM	COR
HOM	1	0,013	-0,06	0,28	-0,03	-0,42	0,47	0,01
CON		1	0,99	0,004	0,812	-0,61	0,56	-0,80
DIS			1	-0,01	0,80	-0,59	0,56	0,82
MEA				1	-0,09	-0,18	0,17	-0,08
VAR					1	-0,29	0,29	-0,33
ENT						1	-0,98	0,68
ASM							1	-0,63
COR								1

Tabelle 15 Trennbarkeitspotential der Texturmasse nach Haralick für die Klassen AVAL und UNDI für Lawinenkegel vom Typ A. Der Wert eins bezeichnet eine vollständige Trennbarkeit, der Wert null eine komplette Überlappung der Stichproben

Texturmass	Trennbarkeitspotential
original Grauwert	0,0788
<i>Homogeneity</i>	0,2368
<i>Contrast</i>	0,9501
<i>Dissimilarity</i>	0,9481
<i>Mean</i>	0,0194
<i>Variance</i>	0,3021
<i>Entropy</i>	0,9959
<i>Angular 2nd Moment</i>	0,9949
<i>Correlation</i>	0,9772

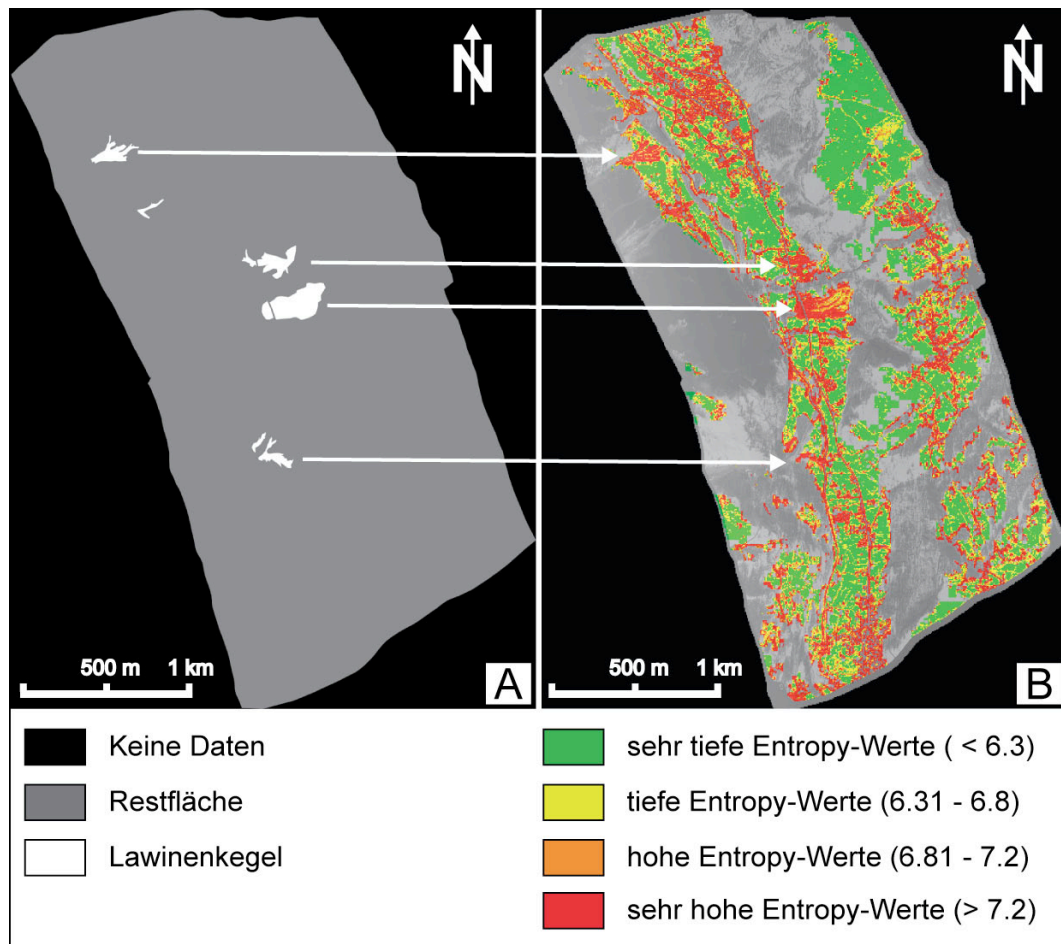


Abbildung 58 Durch visuelle Interpretation der Luftbilder erstellte Bodenreferenz (A) und Klassifikation der Schneeoberflächenrauigkeit, basierend auf dem Mass *Entropy* im Testgebiet Evolène VS (B). Gebiete, bei denen die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten von Lawinenablagerungen sehr gering ist, wurden vorgängig mit Hilfe von Zusatzinformationen ausmaskiert (z.B. sehr steiles Gelände, Wald etc.)

Der Vergleich zwischen den Referenzdaten und der Klassifikation der Oberflächenrauigkeit macht deutlich, dass alle Lawinenkegel hohe bis sehr hohe *Entropy*-Werte aufweisen. Die ungestörte Schneedecke dagegen zeigt vorwiegend sehr tiefe Werte. Dieses Bild bekräftigt die Resultate der Texturanalyse und zeigt, dass der Texturparameter *Entropy* ein geeignetes Werkzeug zur Unterscheidung von Lawinenkegeln und ungestörter Schneedecke ist. Allerdings macht das Beispiel aus Abbildung 58 auch deutlich, dass in der Talsohle sehr viele andere schneebedeckte Oberflächen ebenfalls hohe *Entropy*-Werte aufweisen. Folgende Oberflächen sind dabei im Testgebiet Evolène VS besonders bedeutend:

- Schneebedeckte Strassen und Wege sowie Strassenränder mit Schneeablagerungen von Räumungsfahrzeugen
- Kleinere Gebäude und ihre Schlagschatten
- Waldränder und Einzelbäume mit ihren Schlagschatten
- Gelände, welches von grösseren Felsbrocken durchsetzt ist

Die Analyse der Unterscheidbarkeit zwischen diesen Objekten und Lawinenkegeln anhand der Textureigenschaften zeigt ein deutlich geringeres Unterscheid-

barkeitspotential als bei den Klassen AVAL und UNDI. Allerdings erreichen die Masse *Dissimilarity*, *Mean* und *Correlation* Trennbarkeitswerte von ungefähr 0.9 (Abbildung 59). Dies deutet darauf hin, dass diese Masse zumindest in Kombination mit anderen Parametern für die Klassierung von Lawinenablagerungen hilfreich sein können.

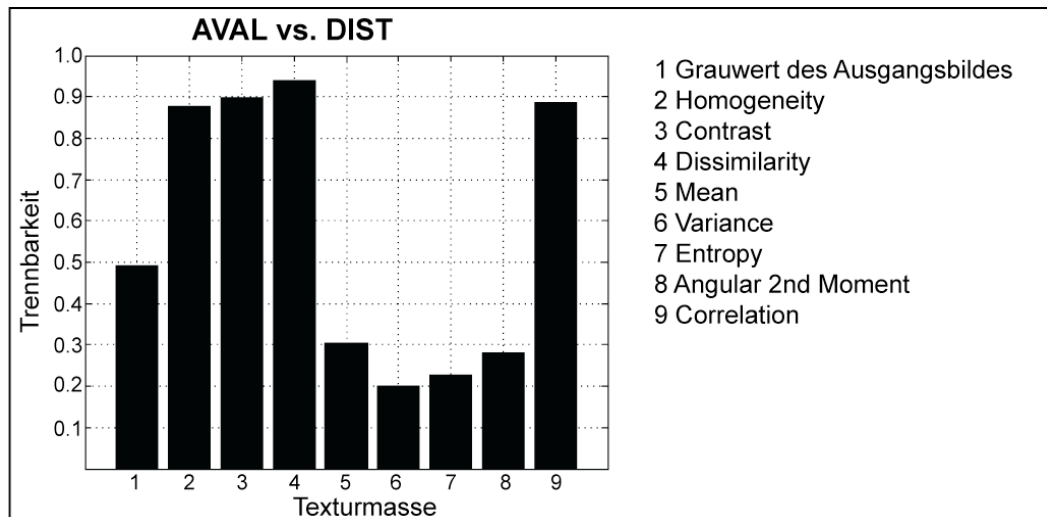


Abbildung 59 Trennbarkeitsanalyse für die GLCM Texturmasse für die Klassen Lawinenkegel (AVAL) und Störobjekte (DIST) wie Siedlungsgebiete oder Waldränder

Besonders bei der Klassierung von grossen Tallawinen treten zahlreiche Störobjekte auf. Mit zunehmender Höhe über Meer nimmt ihre Zahl aufgrund der dünneren Besiedlung und dem Rückgang der bestockten Flächen aber tendenziell ab. Bei der Klassifikation von Lawinen im Hochgebirge treten deutlich weniger solcher Störobjekte auf. Zudem lassen sich diese Objekte relativ einfach anhand von Zusatzinformationen wie der Grösse, der Form und der spektralen Eigenschaften erkennen und von den Lawinenkegeln trennen. Abbildung 60 zeigt das Resultat der Klassifikation des Testgebietes Evolène nach der Eliminierung der Störobjekte.

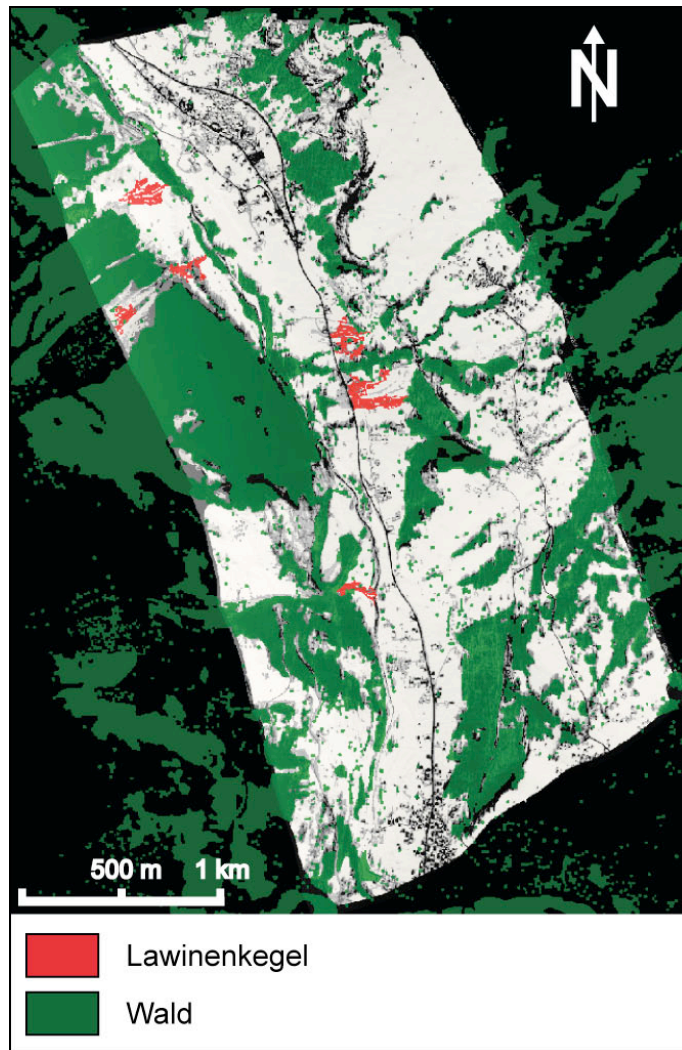


Abbildung 60 Klassifikation der Lawinenkegel im Testgebiet Evolène VS nach der Elimination von störenden Objekten

Für die Texturanalyse mit den skalierten Luftbildern werden dieselben Parameter-einstellungen wie für die vorangegangene Untersuchung verwendet (vgl. Tabelle 14 S. 94). Abbildung 61 zeigt das Ergebnis der Trennbarkeitsanalyse für die Texturmasse nach Haralick für die Bilddaten skaliert auf 0.5 und einen Meter.

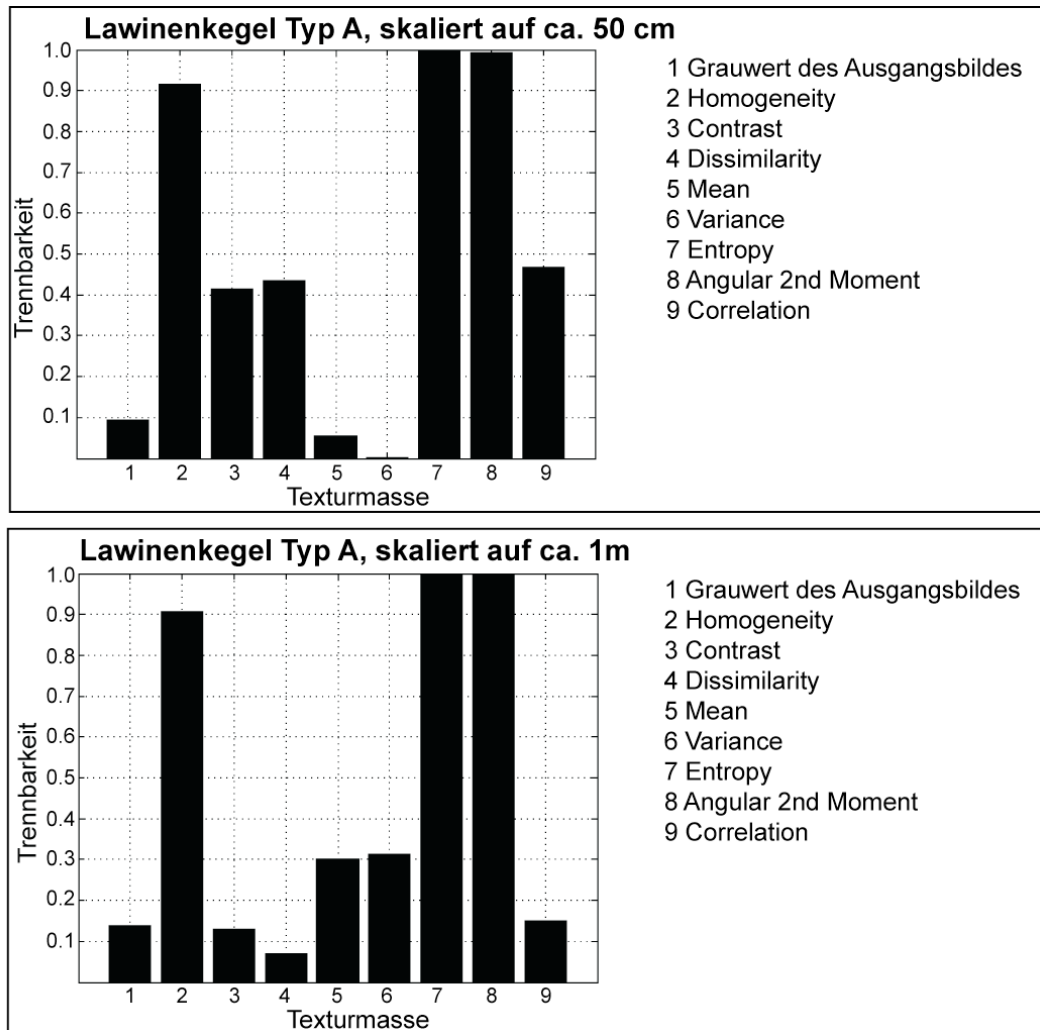


Abbildung 61 Trennbarkeitsanalyse für die untersuchten GLCM-Texturmasse auf den skalierten Daten zur Simulation von höchstauflösenden Satellitensensoren (Filterboxgröße 25 Pixel)

Abbildung 62 zeigt Trennbarkeit der Klassen AVAL und UNDI für das Mass *Entropy* bei unterschiedlicher Pixelgröße der Ausgangsdaten und variierender Filterboxgröße. Die anderen Texturmasse sind, abgesehen vom *Angular 2nd Moment* und der *Homogeneity*, ab einer Pixelgröße von mehr als 30 cm für die Unterscheidung der Klassen kaum mehr zu gebrauchen (vgl. Abbildung 61).

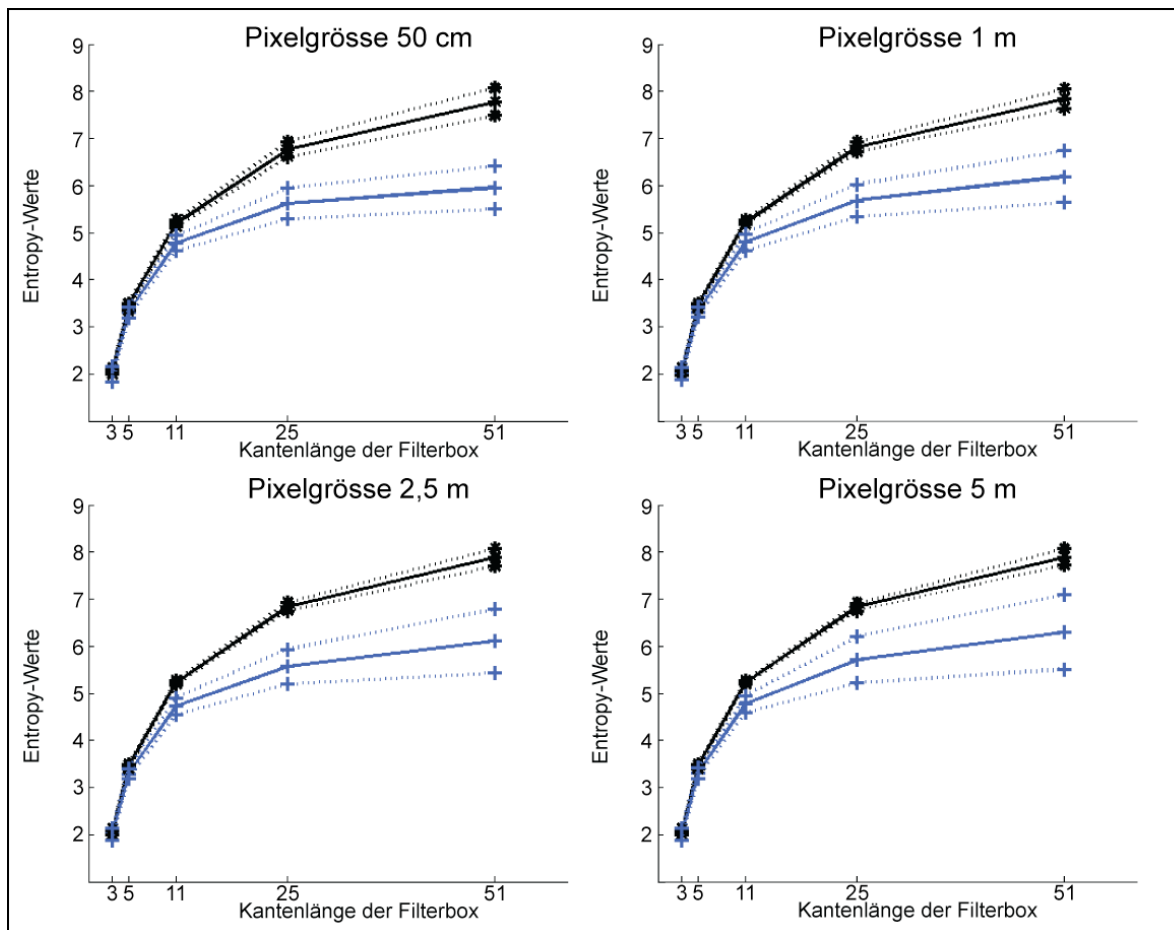


Abbildung 62 Variation der Filterboxgröße für das Mass *Entropy* bei unterschiedlicher räumlicher Auflösung der Eingangsdaten. Schwarz: Mittelwert von AVAL +/- eine Standardabweichung, Blau: Mittelwert von UNDI +/- eine Standardabweichung.

Die Texturanalyse mit den skalierten Daten (Abbildung 61) zeigt deutliche Unterschiede zu den Resultaten der Analyse mit den Bildern in Originalauflösung. So besitzen die Masse *Entropy/Angular 2nd Moment* zwar nach wie vor ein sehr hohes Trennbarkeitspotential von nahezu 100%, die Ergebnisse der Masse *Contrast/Dissimilarity* dagegen werden mit verminderter räumlicher Auflösung deutlich schlechter. Dafür eignet sich das Mass *Homogeneity*, welches in der Untersuchung auf den Originaldaten nur über ein geringes Trennbarkeitspotential verfügt, nun relativ gut zur Trennung der beiden Klassen. Dies lässt darauf schliessen, dass das Mass *Homogeneity* erst bei Filterboxen mit grosser Kantenlänge aussagekräftig wird. Bei abnehmender räumlicher Auflösung setzt sich dieser Trend fort. Die Veränderung des Trennbarkeitspotentials für die beiden Klassen AVAL und UNDI ist überraschend gering (vgl. Abbildung 62). Allerdings muss die Filterbox für ein ansprechendes Ergebnis sehr gross gewählt werden, was mit abnehmender räumlicher Auflösung immer grösseren absoluten Flächen entspricht. Dadurch steigt die Gefahr, dass angrenzende Objekte die Textur der Untersuchungsobjekte beeinflussen und eine saubere Klassifikation beeinträchtigen.

Grundsätzlich lässt sich festhalten, dass auch auf panchromatischen Daten mit einer räumlichen Auflösung von einem Meter und mehr Texturmasse zur Unterscheidung der Lawinenkegel von der ungestörten Schneedecke erfolgreich einge-

setzt werden können. Ab einer räumlichen Auflösung von ungefähr fünf Metern wird das Erfassen der charakteristischen Textur von Lawinenkegeln aufgrund ihrer typischen Dimension aber kaum mehr möglich sein. Ausnahmen können aber sehr grossflächige Ablagerungen von Tallawinen bilden.

6.8. Schlussfolgerungen

Textureigenschaften von Objekten sind eine wichtige Informationsquelle zur Interpretation und Klassierung von Fernerkundungsdaten (Haralick et al., 1973; Lillesand und Kiefer, 2000). Die vorliegende Analyse der Textureigenschaften von Lawinenkegeln und der ungestörten Schneedecke zeigen deutlich, dass sich ausgewählte statistische Texturmasse zur Unterscheidung von Lawinenkegeln und der ungestörten Schneedecke eignen. Die Hypothese aus Kapitel 6.4 ist aufgrund der durchgeführten Untersuchungen verifiziert.

Mangels Datensätzen von satellitengestützten Sensoren, welche frische Lawinenablagerungen enthalten, werden solche Bilddaten durch die Skalierung der Luftbilder simuliert. Diese Untersuchung zeigt, dass die Klassen AVAL und UNDI mit den Massen *Entropy/Angular 2nd moment* auch auf panchromatischen Daten mit einer räumlicher Auflösung von einem Meter gut unterschieden werden können. Bei schlechterer räumlicher Auflösung wird die Gefahr des Einschlusses benachbarter Objekte in die Filterbox deutlich erhöht. Diese Ergebnisse müssen aber noch an Daten von realen satellitengestützten Sensoren getestet werden. Solche Datensätze stehen aber für diese Untersuchung nicht zur Verfügung.

Die Frage nach den optimalen Einstellungen der Parameter (vgl. Kapitel 6.4) lässt sich wie folgt beantworten. Bereits einfach zu berechnende Masse, abgeleitet aus der Statistik erster Ordnung, zeigen sehr gute Resultate (vgl. Kap. 6.7.1). Allerdings korrelieren diese Masse sehr stark, so dass ihre Kombination kaum eine Verbesserung der Unterscheidbarkeit bringt. Es genügt also, eines dieser Masse in die Klassifikation einzubeziehen, um das Potential der Texturmasse, basierend auf der Statistik erster Ordnung, voll auszuschöpfen. Bei der Analyse der Masse basierend auf der Statistik zweiter Ordnung zeigt die Gruppe *Entropy/Angular 2nd moment* die besten Resultate. Die Masse *Contrast/Dissimilarity* sowie *Correlation* zeigen geringfügig schlechtere Ergebnisse (vgl. Kap. 6.7.2). Diese Masse zeichnen ein deutlich differenzierteres Bild der Textur als die Masse basierend auf der Statistik erster Ordnung. Dies deshalb, weil sie auf der Nachbarschaft der Pixel basieren und räumliche Informationen einbeziehen, welche einen Grossteil der Textur ausmachen.

Die Untersuchung der Parametereinstellung (Kap. 6.7.2.1) ergibt, dass vor allem der Parameter Kantenlänge der Filterbox die Güte der Ergebnisse beeinflusst. Die Parameter Distanz und Richtung sind nur von untergeordneter Bedeutung. Grundsätzlich verbessert sich das Ergebnis der Trennbarkeitsanalyse mit zunehmender Kantenlänge der Filterbox. Allerdings steigt dabei der Rechenaufwand massiv an und die Gefahr, dass angrenzende Objekte die Ergebnisse verfälschen nimmt zu. Deshalb wird eine Filterbox von 25 mal 25 Pixeln für Daten mit einer

räumlichen Auflösung von 15 bis 100 cm als optimaler Kompromiss vorgeschlagen.

Die Experimente in Kapitel 6.7.2.2 zeigen deutlich, dass eine Klassifikation der Lawinenkegel alleine aufgrund von Texturparametern keine zufriedenstellenden Ergebnisse ergibt. Zu viele andere Bodenbedeckungsarten, wie Strassen und Wege oder Gebäude mit Gärten, weisen ähnliche Texturwerte wie die Lawinenkegel auf. Die ungestörte Schneedecke dagegen lässt sich bereits aufgrund eines Texturparameters sehr gut von allen anderen Bodenbedeckungsarten unterscheiden. Durch den Einbezug weniger zusätzlicher Parameter gelingt es aber, auch die Lawinenkegel von den anderen Objekten zu trennen.

Die in diesem Kapitel gewonnen Erkenntnisse werden mit den Resultaten aus den Kapiteln 4 und 5 kombiniert und im Kapitel 7 für die automatisierte Erkennung und Kartierung von Lawinen in ADS40 Scannerdaten eingesetzt.

Kapitel 7

Anwendung: Automatisierte Erkennung und Kartierung von Lawinenablagerungen im Testgebiet Davos

7.1. Einleitung

Grosse Tallawinen bedrohen Menschen, Gebäude und Verkehrsinfrastrukturen in den Alpen seit der Besiedlung dieses Lebensraumes. Der Fokus der Lawinenforschung liegt bis heute auf diesen grossen Schadenlawinen. Sie werden systematisch erfasst und in der Schaden-Lawinen-Datenbank am SLF archiviert (Latarnser et al., 1995). Die Mehrheit der Lawinnenniedergänge sind aber kleinere Schneebrettlawinen, welche in steilem und oft unzugänglichem Gelände niedergehen. Aufgrund der zunehmenden Zahl von Wintersportlern, welche als Tourengänger oder Ski- und Snowboardfahrer neben den Pisten im hochalpinen Gelände unterwegs sind, stieg die Zahl der Personen, welche von kleineren bis mittleren Lawinen verschüttet worden sind, in den letzten Jahren markant an (Harvey und Zweifel, 2008). Daten über mittlere und kleine Lawinenereignisse werden aber nur dann systematisch erfasst, wenn Menschen verschüttet, und diese Ereignisse auch gemeldet werden. Informationen über kleinere und mittlere Lawinen sind aber wichtig beispielsweise für die Entscheidungsfindung bei der Öffnung von Skipisten und bei der Sperrung von Strassen sowie für die Evaluation der Lawinenprognose (vgl. Kap. Motivation). Nur in vereinzelt Regionen wie Davos hat die grossflächige Beobachtung und Kartierung von Lawinenereignissen ohne Schadenfolgen Tradition. Die kontinuierliche Beobachtung und Erfassung kleinerer bis mittlerer Lawinen im Landwasssertal seit dem Winter 1949/50 ist ein Ausnahmefall (SLF, 1951 - 2007) .

Seit längerer Zeit sind Bestrebungen im Gange, eine nationale Datenbank aufzubauen. Seit dem Winter 1999/00 werden die Lawinenbeobachtungen direkt auf der Onlineplattform des Interkantonalen Frühwarn- und Kriseninformationssystem IFKIS eingetragen (SLF, 2002). Die Beobachtung der Lawinen erfolgt dabei aber nicht systematisch. Spezialisten aus allen Landesteilen tragen ihre Beobachtungen manuell auf digitalen Landeskarten ein, wobei das Beobachternetz in der Region Davos am dichtesten ist. Ereignisse in abgelegenen Regionen können aber aufgrund der beschränkten Zugänglichkeit so nicht erfasst werden.

Für eine flächendeckende, systematische Kartierung von Lawinen bieten sich Fernerkundungsdaten an, da diese auch in für Beobachter unzugänglichen Gebieten erhoben werden können (Bühler et al., 2009). Fernerkundungssensoren wurden bereits erfolgreich für die Kartierung von weiteren alpinen Naturgefahren wie

Erdrutschen und Murgängen (Mantovani et al., 1996; Metternich et al., 2005) oder Überschwemmungen eingesetzt (Bessis et al., 2004; Buehler et al., 2006; Henry et al., 2003).

7.2. Hypothese

Aufbauend auf den vorangegangenen Kapiteln wird untersucht, inwiefern die erörterten Methoden eingesetzt werden können, um Lawinenkegel zu erkennen und zu kartieren. Die Hypothese lautet:

Lawinenablagerungen unterschiedlicher Grössenordnungen können im Testgebiet Davos mittels optischen, direktionalen Fernerkundungsdaten des Sensors ADS40 automatisch und grossräumig erkannt und kartiert werden.

7.3. Untersuchungsgebiet

Das Untersuchungsgebiet liegt im Südosten der Schweiz im Kanton Graubünden und erstreckt sich über eine Gebirgskette, welche das Landwassertal nach Westen begrenzt. Diese NE-SW verlaufende Gebirgskette wird teilweise touristisch intensiv genutzt (Abbildung 63). Der Weissfluhgipfel im Nordwesten des Untersuchungsgebietes ist mit 2834 Metern über Meer die höchste Erhebung. Der tiefste Punkt liegt mit einer Höhe von 1443 Metern über Meer im Landwassertal bei Davos-Glaris. In den tieferen Lagen im Osten und Westen der Gebirgskette liegen einige hochalpine Wälder, welche mit zunehmender Höhe lichter werden. Ansonsten ist die Oberfläche vorwiegend von hochalpinen Wiesen, Geröll und Fels bedeckt. Das Gebiet ist durch verschiedene Steilhänge charakterisiert, an welchen in der Vergangenheit mehrfach Lawinen niedergegangen sind. Der nördliche Teil des Gebietes ist durch die Parsenn-Bahnen gut erschlossen und die Mitarbeiter des SLF verfügen in dieser Region über langjährige Erfahrungen mit Lawinnenniedergängen. Der südwestliche Teil des Untersuchungsgebietes ist deutlich schwieriger erreichbar und wird im Winter nur von Tourengängern aufgesucht. Bei hoher Lawinengefahr sind diese Gebiete ansonsten unzugänglich. Für die Methodenentwicklung werden drei Testgebiete mit unterschiedlichen Charakteristika ausgewählt (vgl. Abbildung 63). Das Testgebiet Dorfberg (A) liegt im Talgrund und beinhaltet den Kegel der grossen Salezer-Lawine sowie zahlreiche Kegel von Nassschneelawinen kleiner bis mittlerer Grösse. Die Testgebiete Casanna (B) und Hauptertälli (C) liegen in der Gipfelregion des Skigebietes Davos-Parsenn und beinhalten zahlreiche Kegel von Lockerschneelawinen in den hohen und Nassschneelawinen in den tiefen Lagen. Das hochalpine Gelände, die gute Erreichbarkeit der Teilgebiete, sowie die langjährige Erfahrung der Spezialisten vom SLF vor Ort sind ideale Voraussetzungen für diese Untersuchung.

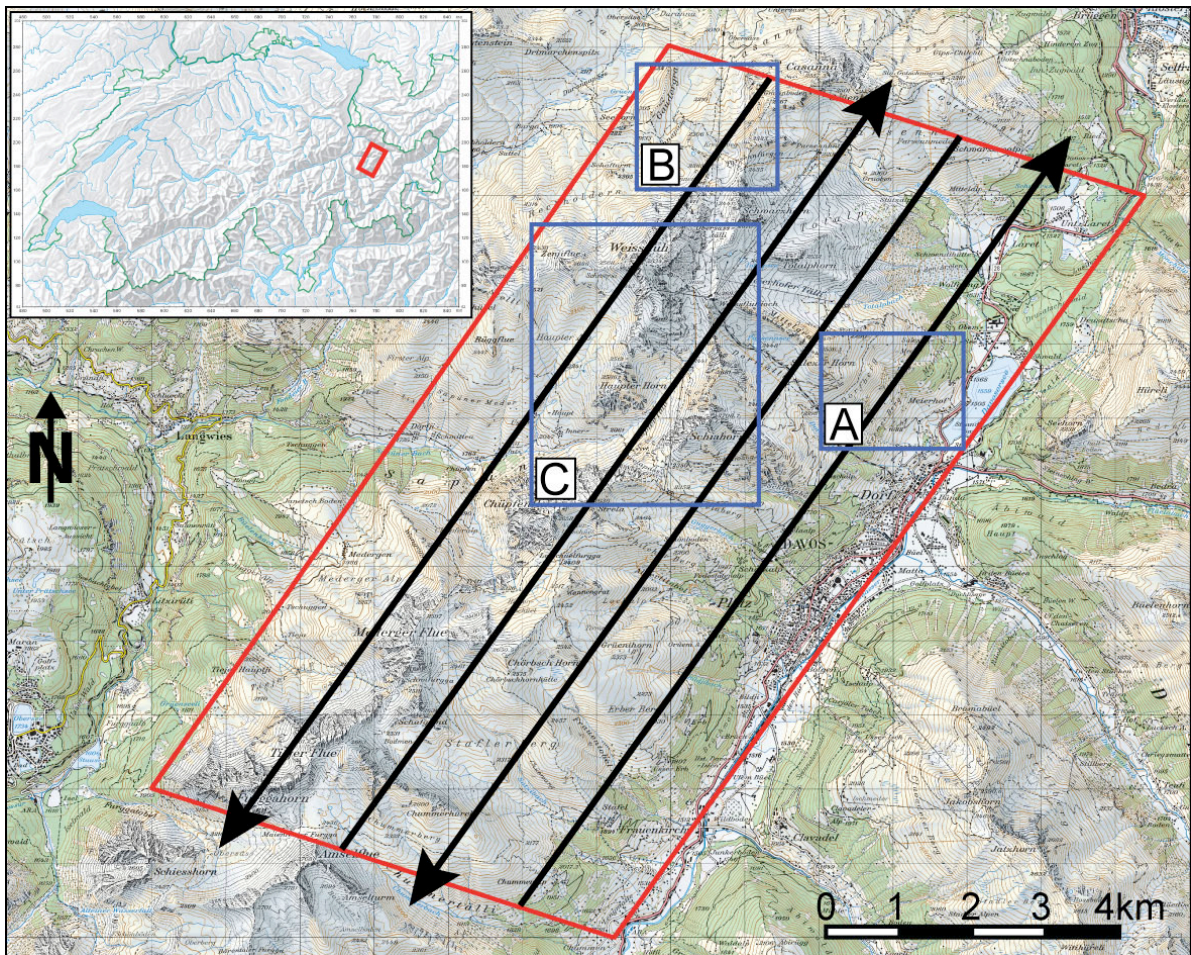


Abbildung 63 Untersuchungsgebiet Davos und die Lage der drei Testgebiete Dorfberg (A), Casanana (B) und Haupter Täli (C). Die Fluglinien sind mit schwarzen Pfeilen markiert. Reproduziert mit Bewilligung von swisstopo (BA091356)

7.4. Daten

Nach einigen, wetterbedingt erfolglosen Versuchen im Winter 2007/08 konnte das Untersuchungsgebiet im Raum Davos am 26. April 2008 erfolgreich mit dem Luftbildscanner ADS40 der Firma Leica Geosystems befliegen werden. Im Rahmen dieser Kampagne wurden zeitgleich Bodenreferenzdaten erhoben. Nachfolgend werden die Sensor- und Aufnahmeparameter sowie die erhobenen Daten detailliert beschrieben.

7.4.1. Sensor ADS40 SH52

Die Entwicklung des digitalen Luftbildscanners ADS40, eine Kooperation des Deutschen Zentrums für Luft und Raumfahrt DLR und der Firma Leica Geosystems erstreckte sich über einen Zeitraum von ungefähr 20 Jahren. Im Jahr 2000 kam der Sensor auf den Markt. Er war damit der erste flugzeuggestützte, digitale Zeilensensor, welcher kommerziell erhältlich war (Sandau, 2005). Ein grosser Vorteil dieses digitalen Sensorsystems gegenüber herkömmlichen analogen Luftbildern liegt in der deutlich besseren Datendynamik von bis zu 12 Bit (Beisel, 2006). Besonders in beschatteten Gebieten und schneebedeckten Regionen werden dadurch Details sichtbar, welche in Luftbildfilmen mit einer Datendynamik

von sechs bis acht Bit nicht erkennbar sind. Tabelle 16 listet die technischen Eckdaten der in dieser Untersuchung verwendeten Sensorkonfiguration auf. Die für den Sensor ADS40 eingesetzten Sensorköpfe können je nach Kundenwunsch in der Anzahl Spektralbänder und Aufnahmewinkel variieren. Der Sensorkopf SH52 (bzw. SH50) ist eine Weiterentwicklung der ersten Generation (SH40 u.a.), welche sich speziell durch die Verfügbarkeit aller Spektralkanäle sowohl in Nadirrichtung wie auch in geneigter Aufnahmrichtung auszeichnet. Die aktuellste Serie von Luftbildscannern (ADS80) ist weiterhin mit dem SH50 ausgerüstet, verfügt aber über ein verbessertes Datenmanagement. Eine ausführliche technische Beschreibung der Sensoreigenschaften geben Leica (2008; 2005).

Tabelle 16 Technische Daten der in dieser Untersuchung verwendeten Sensorkonfiguration ADS40 SH52 (Leica, 2008)

Brennweite	62.7 mm
Blickfeld (quer zur Flugrichtung)	64°
Anzahl CCD	12'000
Räumliche Auflösung	5 bis 50 cm (abhängig von der Flughöhe)
Wellenlängen	Blau: 428 – 492 nm Grün: 533 – 587 nm Rot: 608 – 662 nm Nahinfrarot: 833 – 887 nm Panchromatisch: 465 – 680 nm
Bänder mit Nadir-Blickrichtung	Blau, Grün, Rot, Nahinfrarot, Panchromatisch
Bänder mit Blickrichtung 16° rückwärts	Blau, Grün, Rot, Nahinfrarot, Panchromatisch
Bänder mit Blickrichtung 27° vorwärts	Panchromatisch

Abbildung 64 zeigt den Sensor ADS40 und die Anordnung der Spektralbänder beim eingesetzten ADS40 SH52.

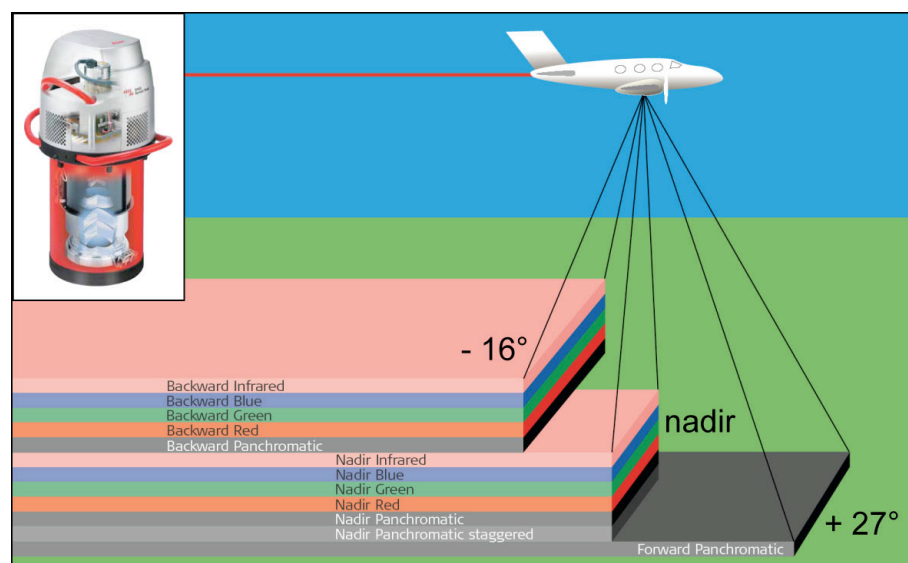


Abbildung 64 Abbildung des Sensorkopfes SH52 und Anordnung der Spektralkanäle, modifiziert nach Leica (2008)

In verschiedenen Pilotprojekten wurde der Sensor ADS40, neben der Verwendung als topographischer Bildsensor, auf seine Eignung für Fernerkundungsanwendungen getestet. So untersuchten Bühler et al. (2007) das Potential des Sensors für die detaillierte Klassifikation von Feldfrüchten. Kellenberger und Nagy (2008) setzten den Sensor erfolgreich für die archäologische Prospektion ein. Diese Arbeiten belegen die hohe geometrische und radiometrische Qualität der Daten und ihr Potential für kleinräumige Fernerkundungsanwendungen. Der Sensor wird heute in der Schweiz vom Bundesamt für Landestopographie swisstopo für die Nachführung der topographischen Karten der Schweiz verwendet. Im Dreijahresrhythmus wird das Gebiet der Schweiz operationell aufgenommen. Dabei entsteht ein flächendeckendes Archiv von ADS40 Bilddaten, welches für multitemporale Untersuchungen und Anwendungen genutzt werden kann (Simmen und Bovet, 2007).

7.4.2. Datenerhebung

Am 26. April 2008 beflog die Firma Leica Geosystems das Testgebiet mit einem Luftbildscanner ADS40 SH52 an Bord einer Pilatus-Porter PC6. In den Tagen kurz vor der Befliegung kam es am Alpennordhang zu Starkniederschlägen. Danach lagen am östlichen Alpennordhang auf 2000 m ü. M. bis zu 4 Meter Schnee, was in dieser Periode nur selten vorkommt (Abbildung 65). Aufgrund der nachfolgenden Erwärmungsphase und dem damit verbundenen Anstieg der Schneefallgrenze, lösten sich unterhalb von 2200 m ü. M. zahlreiche Nassschneelawinen, die teilweise grosse Dimensionen erreichten. Oberhalb von 2200 m ü. M. gingen kleinere Lockerschneelawinen nieder (SLF, 2008b). Aufgrund dieser Vorbedingungen konnte damit gerechnet werden, dass im Testgebiet zahlreiche Lawinen niedergegangen waren. Sowohl kleinere Lockerschneelawinen wie auch mittlere bis grosse Nassschneelawinen konnten erwartet werden.

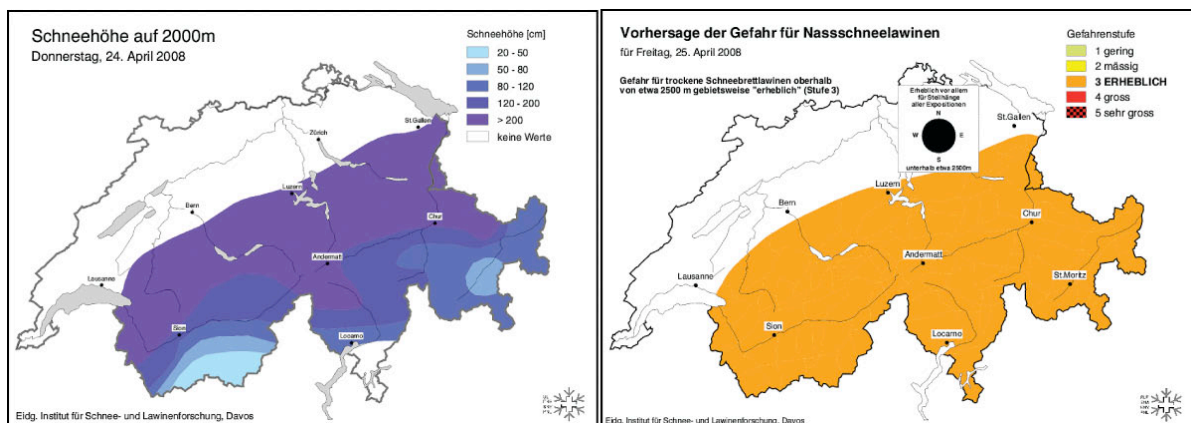


Abbildung 65 Schneehöhe und Lawinengefahrenstufe in der Schweiz kurz vor der Befliegung vom 26. April 2008 (www.SLF.ch, Zugriff: 30. April 2008)

Das Testgebiet wurde mit vier Flugstreifen und einer Überlappung von jeweils 30% aufgezeichnet. Die Länge eines Streifens betrug 16 km, die Breite 5 km. Abbildung 66 zeigt die räumliche Lage der vier Streifen; Tabelle 17 die Aufnahmeparameter.

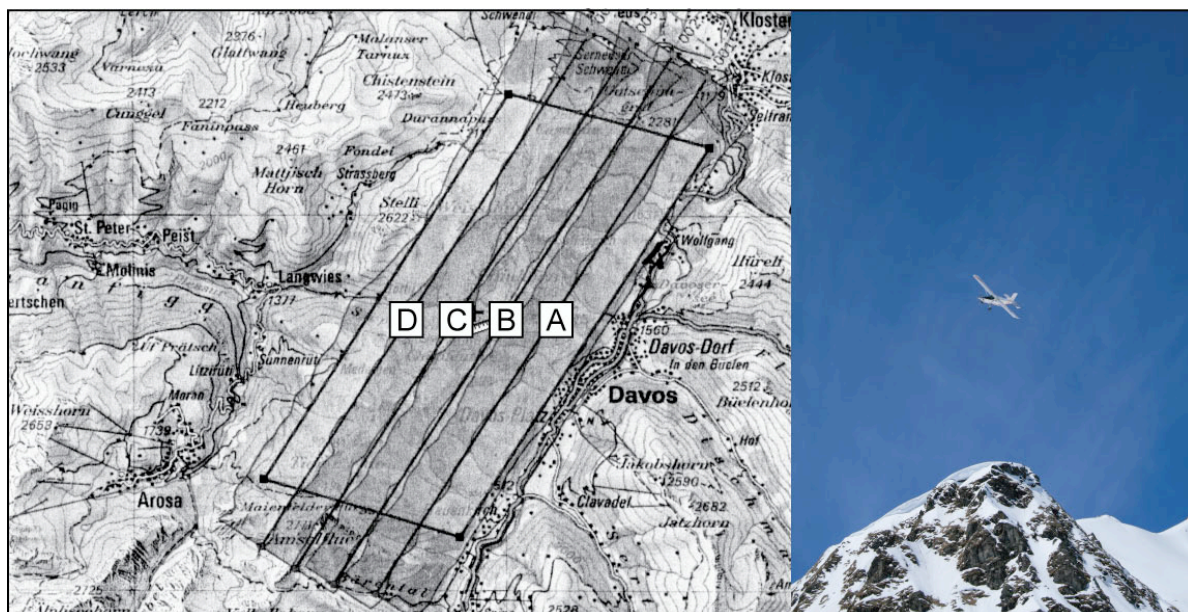


Abbildung 66 Flugstreifen, aufgenommen im Rahmen der Kampagne AVAL08 (links); PC6 von Leica Geosystems kurz nach der Datenaufnahme (rechts, Fotografie: A. Hüni)

Tabelle 17 Aufnahmeparameter der Flugstreifen

Streifen	Startzeit der Aufnahme	Flugrichtung (Azimut)	Mittlere Flughöhe
A	10:54	34,7°	3800 m ü. M.
B	11:04	214,7°	3922 m ü. M.
C	11:34	34,7°	4046 m ü. M.
D	11:25	214,7°	4118 m ü. M.

Die gewählte Flughöhe und die Höhenunterschiede im Gelände führten dazu, dass die Bilddaten mit einer räumlichen Bodenauflösung (*ground sample distance* GSD) von 0,13 bis 0,25 m aufgezeichnet wurden. Abbildung 67 zeigt einen Ausschnitt aus dem Untersuchungsgebiet, welcher den Detailreichtum der Daten illustriert.

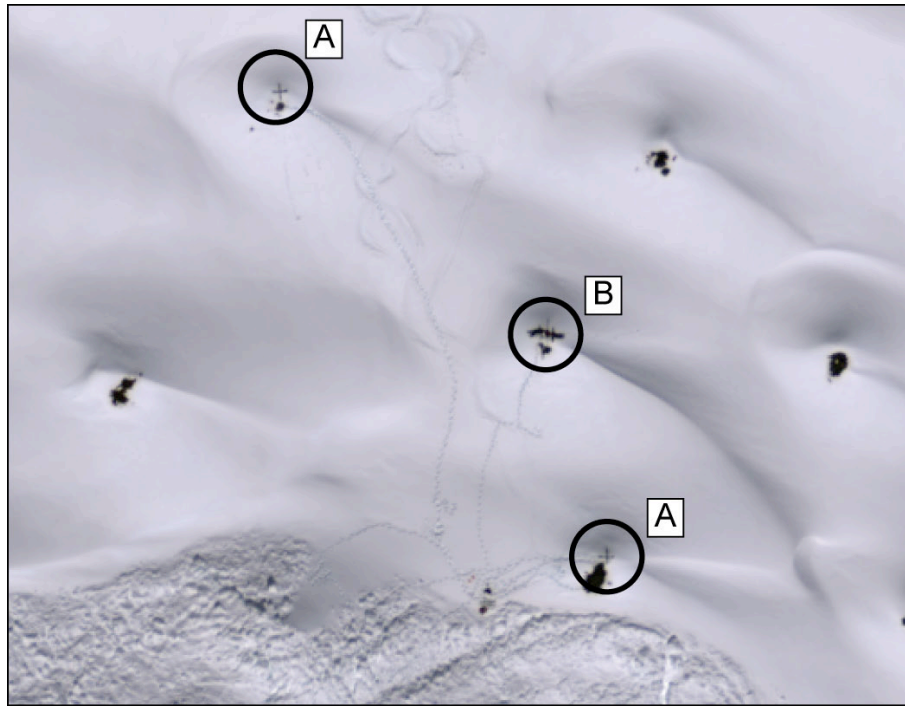


Abbildung 67 Illustration des Detailreichtums der Daten. Deutlich sichtbar sind gekreuzte Skier (A), liegende Personen im Schnee (B). Am unteren Bildrand sind die Ausläufer eines leicht überschneiten Lawinenkegels zu erkennen

Die radiometrische Empfindlichkeit des Sensors wurde vor dem Flug für die Aufnahme von schneebedecktem Gebiet mit den multispektralen und nicht den panchromatischen Bändern optimiert. Dies führte zu einer Sättigung der panchromatischen Bänder über weite Gebiete. Damit sind sie sowohl für die Ableitung eines Oberflächenmodells als auch für die Erkennung und Kartierung von Lawinen nicht geeignet (Mitteilung R. Bosch, Leica Geosystems). Für diese Untersuchung wurden deshalb nur die in Nadir- Blickrichtung aufgenommenen multispektralen Bänder sowie der Nahinfrarotkanal mit Blickrichtung -16° verwendet. Der deutlich grössere Blickwinkelunterschied zwischen den panchromatischen Kanälen ($+27^\circ$ und $-16^\circ = 43^\circ$) konnte somit nicht ausgenützt werden.

7.4.3. Datenvorverarbeitung

Die Daten wurden von der Firma Leica Geosystems auf das Referenzsystem der Schweizer Landeskoordinaten (CH1903) georeferenziert (swisstopo, 2008). Oberflächenmodelle können mittels Autokorrelation direkt aus den ADS40 Daten, aufgenommen aus drei verschiedenen Blickwinkeln, berechnet werden (Gabet et al., 1997; Gruen und Baltsavias, 1987; Wiman, 1998; Zhang, 2005). Weil aber die panchromatischen Bänder für diese Untersuchung nicht verfügbar waren und innerhalb der homogenen Schneefläche nur wenige korrespondierende Punkte (*matching points*) identifiziert werden konnten, war eine Ableitung eines qualitativ genügenden Oberflächenmodells aus diesen Daten nicht möglich (Mitteilung R. Bosch, Leica Geosystems). Die Daten wurden deshalb mit dem aus Laserscannerdaten abgeleiteten digitalen Geländemodell DTM-AV (Gebiete bis zu einer Höhe vom 2000 m ü. M.) und dem digitalen Geländemodell DHM25 der swisstopo (Gebiete über 2000 m ü. M.) korrigiert (swisstopo, 2005a; swisstopo, 2005b). Aufgrund der

sehr hohen räumlichen Auflösung der Bilddaten und der vergleichsweise schlechten räumlichen Auflösung des verwendeten Geländemodells DHM25 oberhalb von 2000 m ü. M., traten bei der Georeferenzierung absolute geometrische Lagefehler von bis zu 5 Pixeln auf. Die relativen Lagefehler zwischen den Kanälen mit unterschiedlichen Blickwinkeln betrugen aber weniger als ein Pixel (Mitteilung R. Bosch, Leica Geosystems).

Weil der Detailreichtum der Bilddaten bei einer räumlichen Auflösung von 0,2 Metern für die Erkennung und Kartierung von Lawinen gemäss ersten Voruntersuchungen zu hoch ist und die Datenmenge die Rechenprozesse stark verlangsamt, wurden die Bilddaten mit einem $\text{sinc}(x/a)$ Interpolationskernel (Oppenheim und Schaeffer, 1975) auf eine räumliche Auflösung von einem Meter skaliert (Abbildung 68). Diese Methode simuliert die Empfindlichkeitsverteilung eines Detektorelements in einem Sensor deutlich besser als die bilineare Interpolation oder die Methode des nächsten Nachbarn (Hore et al., 2007). Durch die räumliche Skalierung werden die vorhandenen Ungenauigkeiten in der Georeferenzierung verwischt und verlieren dadurch an Bedeutung. Eine Beleuchtungskorrektur der Bilddaten, die eine Homogenisierung von Exposition und Hangneigung bewirken könnte, wurde wegen der schlechten räumlichen Auflösung des Höhenmodells nicht durchgeführt. Eine atmosphärische Korrektur wurde ebenfalls nicht durchgeführt, da die atmosphärischen Verhältnisse im räumlich begrenzten Untersuchungsgebiet als stabil angesehen werden können. Der Einfluss der atmosphärischen Verhältnisse auf diese Untersuchung wurde als gering eingestuft.

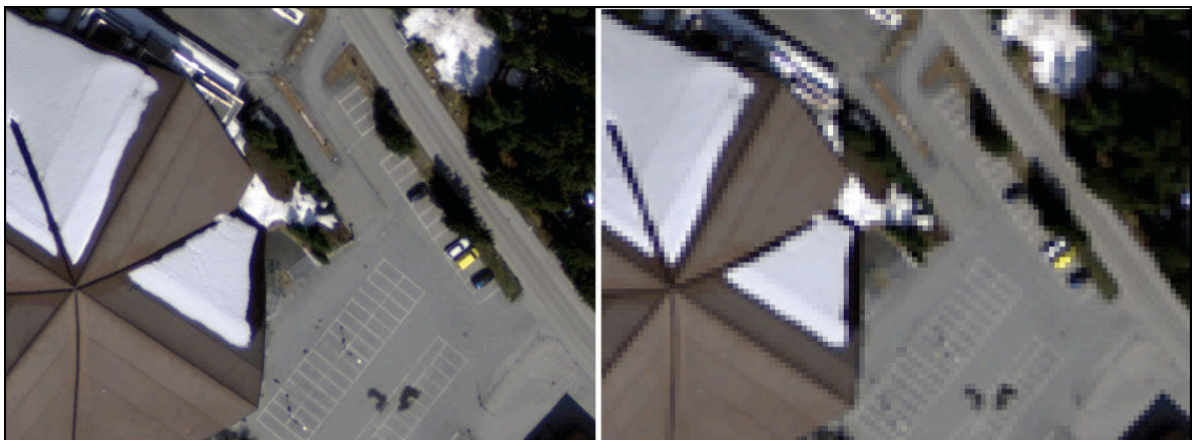


Abbildung 68 Parkplatz der Eishalle Davos in voller räumlicher Auflösung von 20 cm (links) und in der skalierten räumlichen Auflösung von einem Meter (rechts)

7.4.4. Referenzdaten

Für die Überprüfung einer automatisierten Erkennung und Kartierung von Lawinenablagerungen werden möglichst viele unabhängige Daten über in den Bilddaten vorhandene Lawinenkegel benötigt. Am Tag des Überfluges wurden von einem Team im Feld erreichbare Lawinenkegel im Testgebiet kartiert und deren präzise Lage mit GPS Geräten bestimmt. Weil aber die Lawinengefahr als erheblich eingestuft wurde und weil die Parsennbahnen ihren Betrieb am Tag der Befliegung bereits eingestellt hatten, konnten im Feld nur von drei Kegeln Daten aufgenommen werden. Eine umfassende Erhebung der Lawinenniedergänge im

schlecht zugänglichen Gebiet war nicht möglich. Vereinzelt weitere Lawinen-niedergänge wurden von SLF-Beobachtern in die Online-Informationsplattform AVALMAP eingetragen (SLF, 2002). Diese Einträge basierten aber auf Beobachtungen aus dem Tal und sind deshalb unpräzise und unvollständig. Sie geben zwar Anhaltspunkte, wo Lawinen-niedergänge in den Daten gefunden werden können, als Referenz sind sie aber nicht zuverlässig genug. Deshalb wurden die ADS40 Daten in voller räumlicher Auflösung visuell interpretiert. Daraus wurde manuell ein Referenzdatensatz erstellt, welcher für die Überprüfung der Klassifikationsresultate verwendet wurde. Obwohl dadurch keine unabhängigen Referenzdaten zur Verfügung standen und Fehler in der Interpretation nicht vollständig ausgeschlossen werden konnten, existierte keine bessere Möglichkeit, um die Qualität der Ergebnisse zu evaluieren.

7.5. Methoden

Die Lawinenkegel im Testgebiet werden mit einer Prozessierungskette automatisch detektiert und kartiert. Dazu werden direktionale- und spektrale Informationen mit Texturinformationen verknüpft. Abbildung 69 zeigt schematisch den Ablauf des Klassifikationsprozesses.

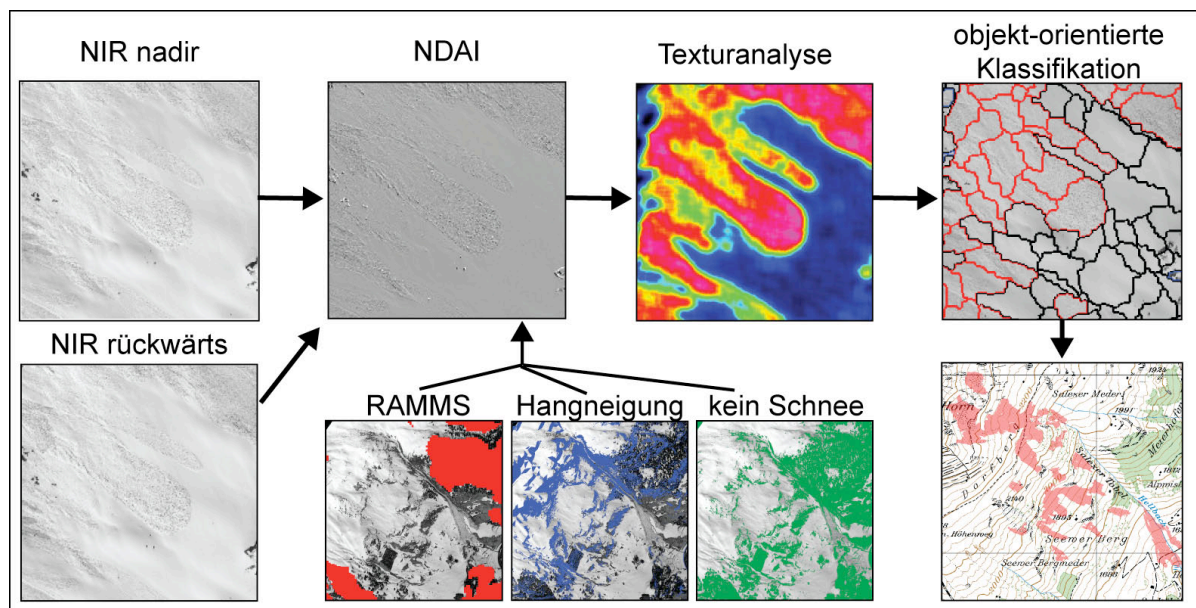


Abbildung 69 Schematischer Ablauf des Klassifikationsprozesses

7.5.1. Ausmaskieren der nicht lawinengefährdeten Gebiete

Auch im Hochgebirge sind nicht alle Gebiete gleichermassen lawinengefährdet. Ungefährdete Regionen können mit Hilfe von zusätzlichen Informationen identifiziert und ausmaskiert werden. Dadurch werden unnötige Fehlklassifikationen vermieden und die Prozessierung der Daten wird beschleunigt. Computergestützte Simulationsmodelle für Lawinenereignisse, wie sie das SLF seit Jahren entwickelt, evaluiert und stetig verbessert, können zur Bestimmung ungefährdeter Regionen eingesetzt werden (Christen et al., 2002; Gruber, 2001; Gruber und Bartelt, 2007; Maggioni und Gruber, 2003; Maggioni et al., 2002). Das numerische Simula-

tionswerkzeug *Rapid Mass Movements* RAMMS verbindet ein physikalisches Fliesslawinenmodell mit einem GIS-System um Auslaufdistancen, Geschwindigkeiten und Druckkräfte von Lawinen vorherzusagen. Es wurde anhand von zahlreichen Beobachtungen von Grosslawinen, hauptsächlich aus dem Jahr 1999, kalibriert. Das Modell umfasst zusätzliche Module für weitere Typen von Massenbewegungen wie Murgänge und Steinschläge (Christen et al., 2008). Abbildung 70 zeigt das Ergebnis einer RAMMS-Modellierung für das Testgebiet Davos, welches zur Ausmaskierung von nicht lawinengefährdeten Gebieten verwendet wird. Die Berechnung der Hangneigung und weiterer Parameter des RAMMS-Modell stützen sich auf das digitale Geländemodell DHM25 der swisstopo. In Gebieten, die durch das RAMMS-Modell als nicht gefährdet ausgewiesen werden, sind mit hoher Wahrscheinlichkeit keine Lawinenkegel zu erwarten. Die Kalibrierung des Modells mit extremen Lawinenereignissen aus 1999 führt im vorliegenden Fall eher zu einer Überschätzung des Ausmasses der gefährdeten Gebiete.

Anrisszonen von Lawinen finden sich vorwiegend in Gebieten mit einer Hangneigung von mehr als 35° und werden deshalb vom RAMMS-Modell als gefährdete Zone ausgewiesen. Allerdings kommen Lawinen bei diesem Gefälle nur äusserst selten zum Stillstand, sondern laufen in flacherem Gebiet aus (McClung und Schaerer, 2006). Deshalb können die Gebiete mit einer Hangneigung über 35° bei der Kartierung von Lawinenkegeln ebenfalls ausgeschlossen werden.

In der vorliegenden Untersuchung wird die Annahme getroffen, dass die Oberfläche der Lawinenkegel hauptsächlich aus Schnee besteht. Mittels eines spektralen Schwellenwerts wurden Gebiete, welche nicht von Schnee bedeckt sind ausmaskiert. Dadurch werden aber auch Teile von Lawinenkegeln ausgeschlossen, welche nahezu vollständig von Schutt bedeckt sind. Sie können deshalb nicht kartiert werden. Abbildung 70 zeigt die maskierten und von der weiteren Untersuchung ausgeschlossenen Gebiete für das gesamte Untersuchungsgebiet.

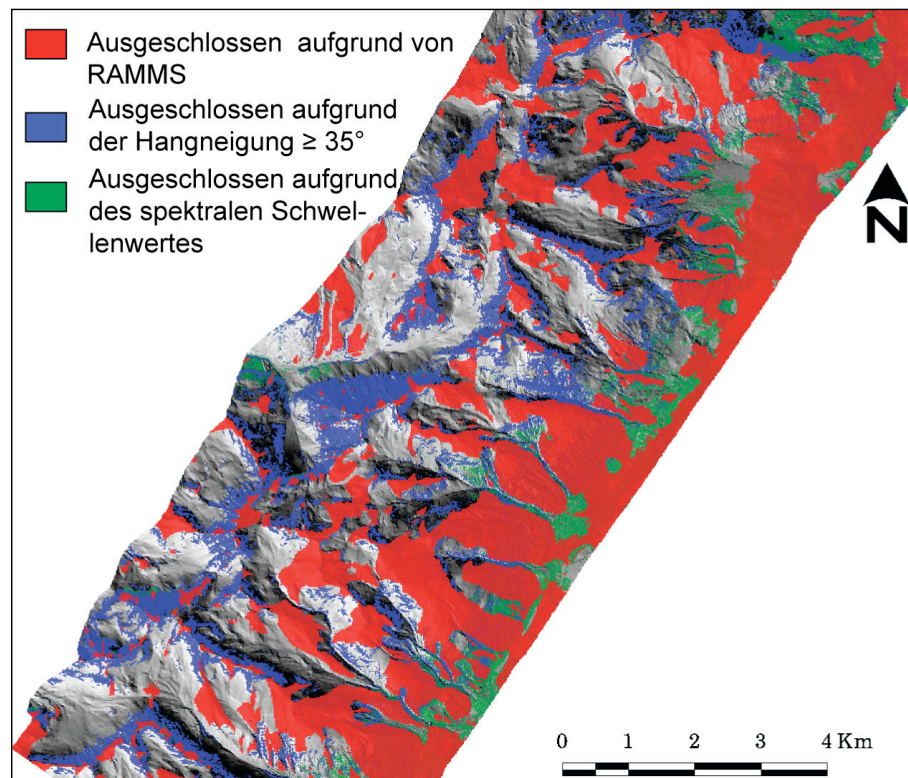


Abbildung 70 Schattiertes Relief des Untersuchungsgebietes überlagert von den Regionen, in welchen das Vorkommen von Lawinenkegeln ausgeschlossen wurde

7.5.2. Nutzung multidirektionaler Reflexionseigenschaften

Die Reflexionseigenschaften von Oberflächen sind, neben den Materialeigenschaften, von der Rauigkeit sowie den Einstrahlungs- und Beobachtungswinkeln abhängig (Mushkin und Gillespie, 2005; Nolin und Payne, 2007). Das directionale Reflexionsverhalten von Lawinenkegeln kann mit räumlich hoch aufgelösten, multiangularen Fernerkundungsdaten erfasst und für deren Erkennung verwendet werden (vgl. Kapitel 5). In einem ersten Schritt des Klassifikationsprozesses werden dazu aus den zwei ADS40 Spektralbändern im nahen Infrarot, aufgenommen in Nadirrichtung und mit einem Blickwinkel von 16° rückwärts, der *normalized difference angular index* NDAI (vgl. 5.5.2) berechnet (Nolin et al., 2002). In NDAI-Daten treten nichtplane Oberflächen deutlich hervor, während ein planes Objekt, wie eine ungestörte Schneedecke, als homogene Fläche erscheint. Die raue Oberflächenstruktur von Lawinenkegeln, die aus einem Gefüge von stark beleuchteten und beschatteten Flächen besteht, zeigt sich als heterogene Textur in NDAI-Daten.

7.5.3. Texturanalyse von NDAI-Daten

Lawinenkegel lassen sich anhand der charakteristischen Textur bereits von Auge gut von der ungestörten Schneedecke unterscheiden. Im zweiten Schritt des Klassifikationsprozesses wird diese lokale Variation der Textur in den NDAI-Daten analysiert. Die Voruntersuchungen (vgl. Kapitel 6) zeigten, dass das Mass „*Entropy*“ (Haralick et al., 1973) sich für die Erkennung von Lawinenkegeln am besten eignet. Lawinenablagerungen wiesen deutlich höhere *Entropy*-Werte als andere schneebedeckte Flächen auf und können mit einem Schwellenwert ausgeschieden

werden. Diese Methode stellt einen aussagekräftigen Indikator für raue Schneeflächen dar. Da neben den Lawinenkegeln auch weitere Flächen, wie Schneeverwehungen oder künstlich angehäuften Schneemassen, eine hohe Oberflächenrauigkeit aufwiesen, ist ein weiterer, korrigierender Klassifikationsschritt notwendig.

7.5.4. Objekt-orientierte Klassifikation

Im Gegensatz zur pixelbasierten Klassifikation werden bei einem objekt-orientierten Ansatz Gruppen von benachbarten Pixeln klassiert, welche vorgängig aufgrund eines Homogenitätskriteriums zu Objekten zusammengefasst worden sind. Die Analyse dieser Objekte erlaubt es, zusätzliche Informationen in die Klassifikation einzubeziehen (Benz et al., 2004), welche zu deutlich besseren Klassifikationsergebnissen führen (Oruc et al., 2004; Yan et al., 2006). Das Gebiet, welches durch die Texturanalyse vorgängig als raue Oberflächen ausgewiesen wurde, wird zu Objekten segmentiert und gruppenweise mittels Indikatoren von den potentiellen Lawinenkegeln unterschieden (Tabelle 18). Kleine Rutsche sind nur sehr selten in der Lage, Personen zu verschütten und Infrastrukturen zu beschädigen. Kegel mit einer Fläche $\leq 100 \text{ m}^2$ werden deshalb ausgeschieden. Die detektierten Lawinenkegel werden abhängig von ihrer Fläche in die beiden Klassen *grosse Kegel* ($> 2000 \text{ m}^2$) und *kleine Kegel* ($2000 - 100 \text{ m}^2$) eingeteilt. Der Fokus in dieser Untersuchung liegt auf der Klasse *grosse Kegel* weil Lawinen dieser Grössenordnung für die Lawinenforschung interessant sind (vgl. Kapitel 1.3, Seite 2). Die Klasse *kleine Kegel* wird genutzt, um die Grenzen der Detektierbarkeit von kleinen Lawinenkegeln auszuloten.

Tabelle 18 Wichtige weitere schneebedeckte Flächen und Objekte mit ebenfalls rauen Oberflächen (Spalte 1), verwendete Parameter zur Klassierung (Spalte 2) und Abschätzung des Differenzierbarkeitspotentials gegenüber Lawinenkegeln (Spalte 3)..

Flächen-/Objekttyp	Parameter	Differenzierbarkeit von Lawinenkegeln
Künstliche Objekte, (z. B. Skilifte, Gebäude etc.)	- direktionale Filter - spektrale Parameter	gut
Künstlich angehäufter Schnee (z. B. Pisten- und Wegränder)	- Nachbarschaftsbeziehungen - Formparameter	schlecht
Künstlich gestörte Schneeflächen (z. B. Skispuren, Spuren von Pistenfahrzeugen und Trittspuren)	- Formparameter - Texturparameter - Nachbarschaftsbeziehungen	mittel
Natürlich gestörte Schneeflächen (z. B. Winderosion, Bachbett)	- Texturparameter - direktionale Filter	mittel
Von spärlicher Vegetation durchsetzte Gebiete	- spektrale Parameter (NDVI) - Texturparameter - Nachbarschaftsbeziehungen	gut

7.6. Resultate und Diskussion

Das Klassifikationsergebnis für das gesamte Untersuchungsgebiet (Abbildung 71) zeigt eine Häufung von Lawinenniedergängen am westlichen Rand des Untersu-

chungsgebietes. Diese entlegene Region, weit weg von der Infrastruktur der Bergbahnen, wird bei erhöhter Lawinengefahr von den Beobachtern im Feld nicht erfasst. Dies ist ein Beispiel für die Eignung der Fernerkundungsdaten zur Erfassung von Lawinen in unzugänglichem Gelände. Die Verteilung der Lawinnenniedergänge in Abhängigkeit von der Exposition (Abbildung 72) zeigt, dass kurz vor der Befliegung Lawinen an Hängen aller Hauptexpositionen niedergegangen sind. Eine Häufung der Ereignisse trat an nordexponierten Hängen auf. Diese Beobachtung deckt sich mit Beobachtungen im Feld, hauptsächlich im gut zugänglichen Dischmatal, wo in derselben Periode ebenfalls eine Häufung von Lawinen an nördlich bis nordöstlich exponierten Hängen auftrat. Die detektierten Lawinnenkegel werden oft in Gebieten mit einer durchschnittlichen Hangneigung von 20 bis 30° beobachtet (Abbildung 73). Dabei handelt es sich um kleinere Lawinnenniedergänge, welche bereits im steilen Gelände zum Stillstand kamen. Einige wenige, grössere Lawinen drangen bis in flache Gebiete vor.

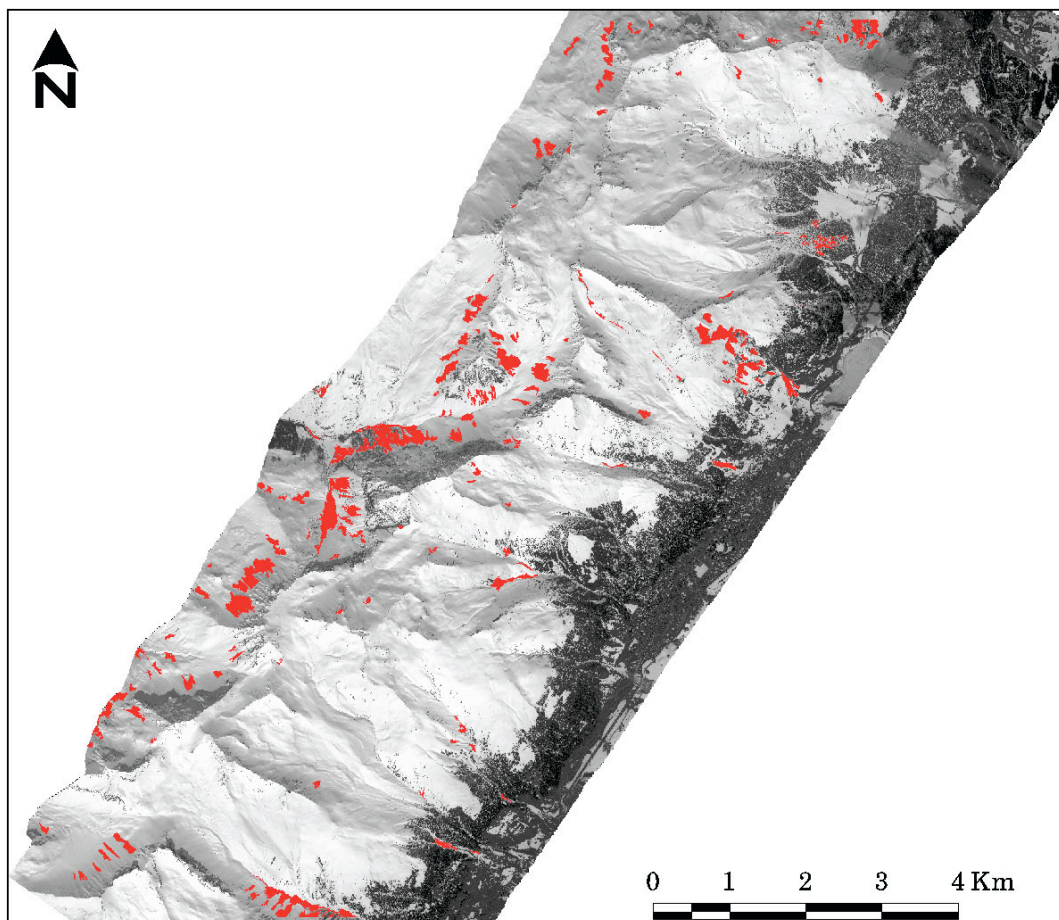


Abbildung 71 Resultat des Klassifikationsprozesses für das gesamte Untersuchungsgebiet. Detektierte Lawinnenkegel der Klasse *grosse Kegel* sind in rot dargestellt

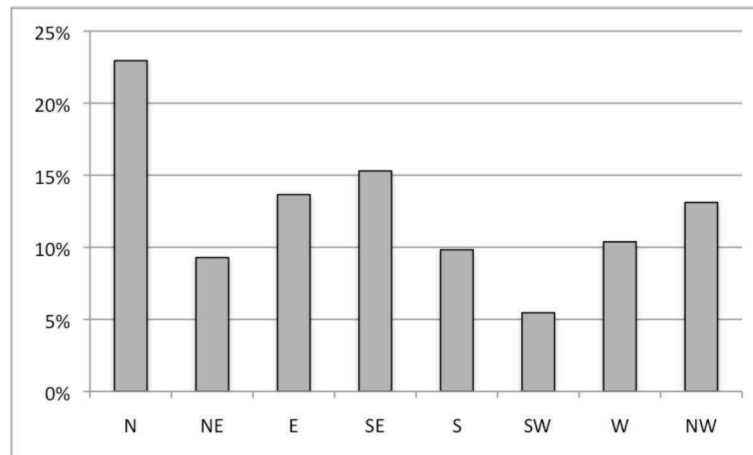


Abbildung 72 Verteilung der Anzahl Lawinnenniedergänge im gesamten Untersuchungsgebiet in Abhängigkeit der Exposition

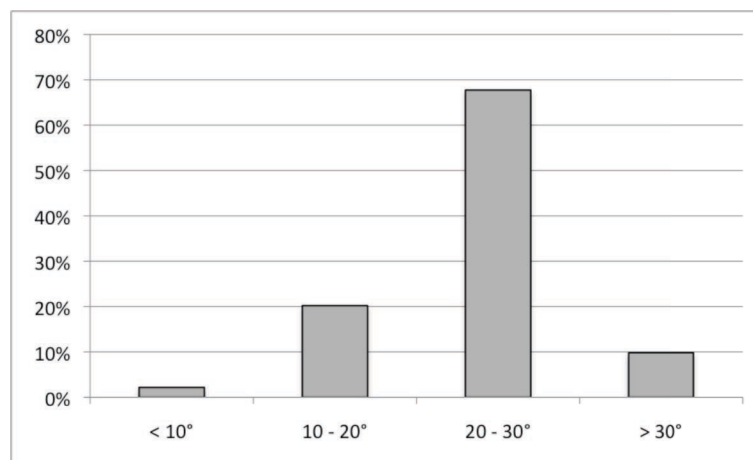


Abbildung 73 Verteilung der Lawinenkegel im gesamten Untersuchungsgebiet abhängig von der durchschnittlichen Hangneigung

Die Abbildungen 73 bis 75 zeigen die Klassifikationsergebnisse in den drei Testgebieten (vgl. Abbildung 63), dargestellt in höherer räumlicher Auflösung.

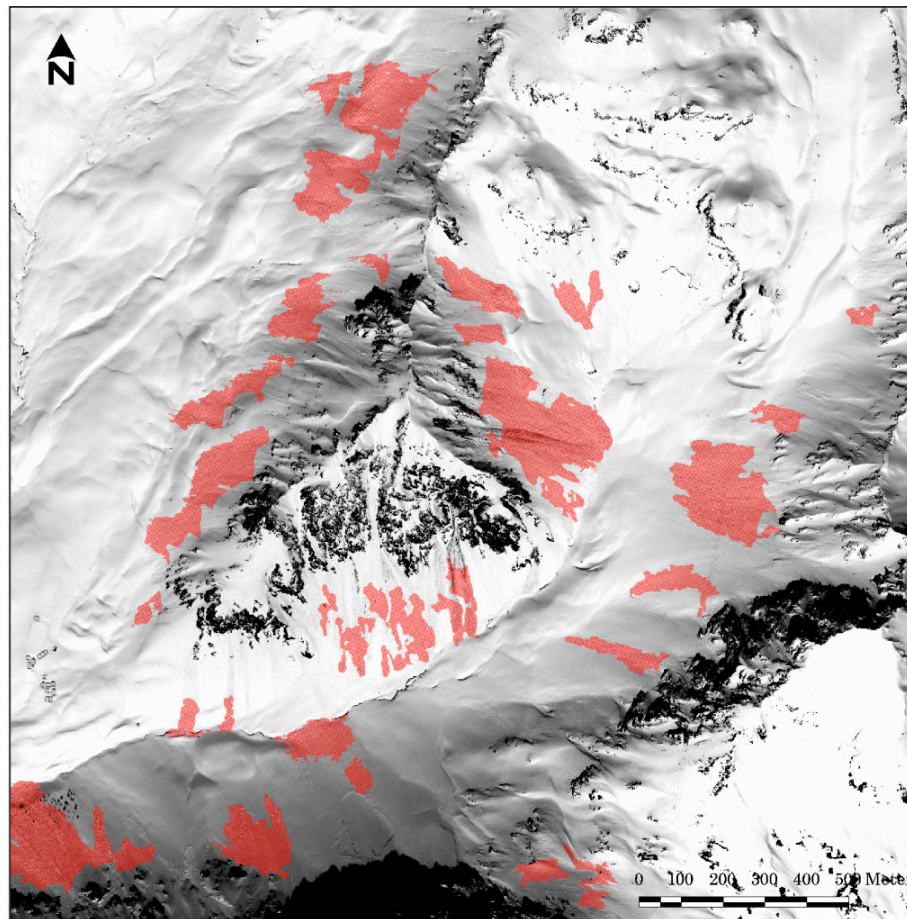


Abbildung 74 Klassierte Lawinenkegel mit einer Fläche grösser als 2000 m² im Testgebiet Haupter Tälli. Lawinen sind an Hängen mit unterschiedlicher Exposition aufgetreten

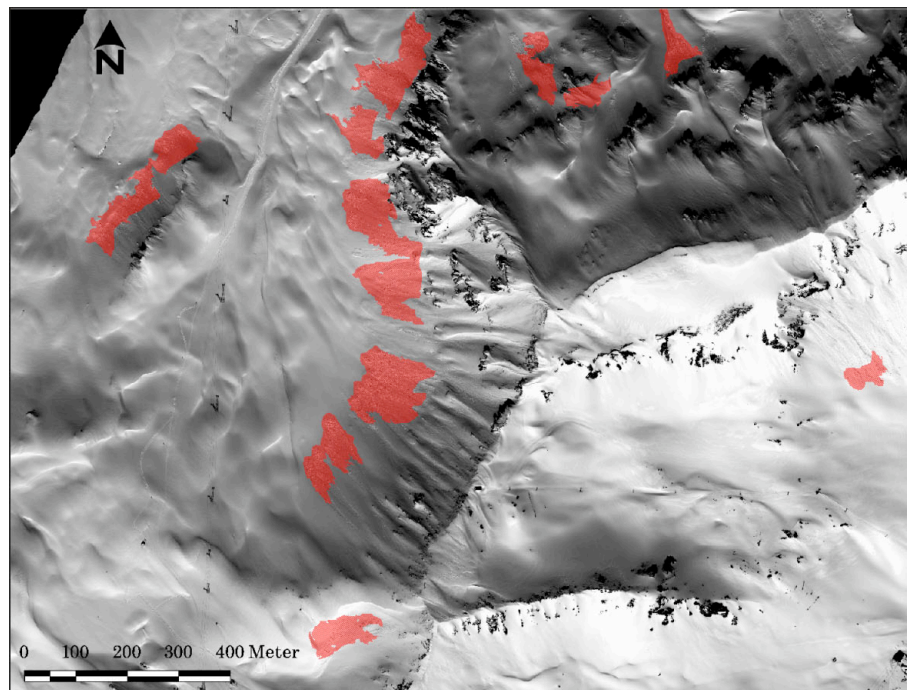


Abbildung 75 Klassierte Lawinenkegel mit einer Fläche grösser als 2000 m² im Testgebiet Casanna. Die Lawinen sind hauptsächlich an nord bis nordwest exponierten Hängen aufgetreten

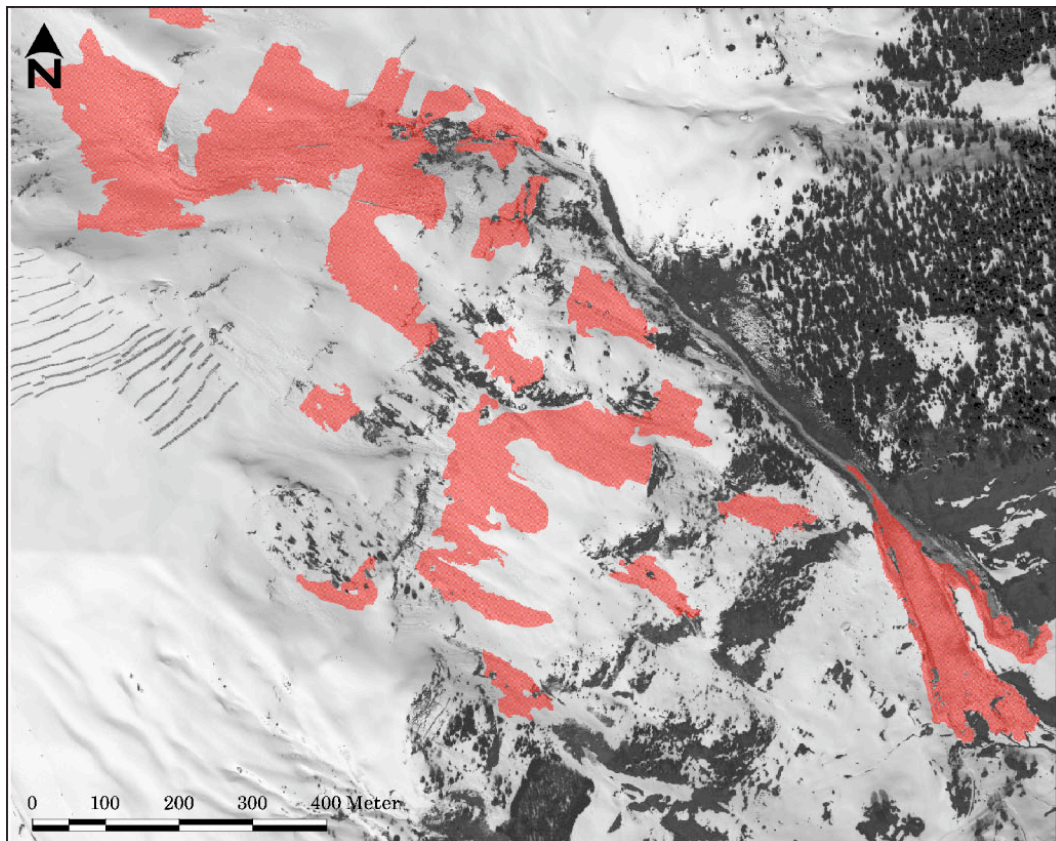


Abbildung 76 Klassierte Lawinenkegel mit einer Fläche grösser als 2000 m² im Testgebiet Dorfberg. Die Lawinen sind hauptsächlich am südost exponierten Hang niedergegangen

Die Salezer-Lawine (rechter Bildrand in Abbildung 76) ist am 22. 04. 2008 als grosse Nassschneelawine niedergegangen. Der einfache Zugang zu diesem Lawinenkegel ermöglichte die Bodenerhebung von GPS-Referenzdaten und Fotografien. Die umfassenden Referenzdaten von dieser Lawine ermöglichen eine gute Abschätzung der Klassifikationsgüte (Abbildung 77).

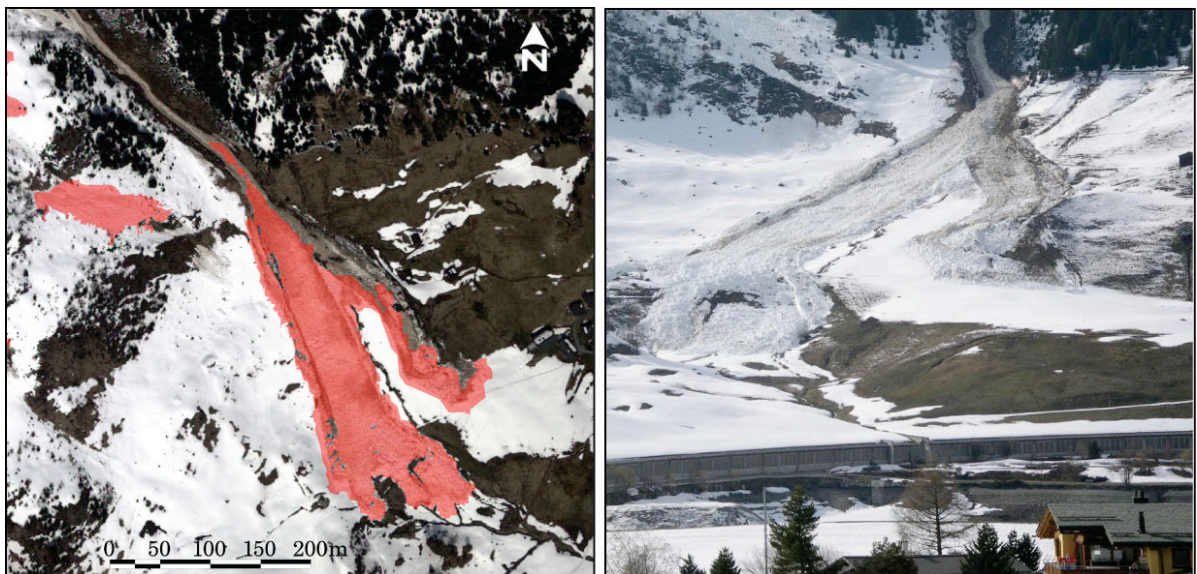


Abbildung 77 ADS40 Echtfarbandarstellung der Salezer-Lawine überlagert mit dem Klassifikationsergebnis (links). Schrägansicht der Salezer-Lawine aufgenommen einen Tag vor der Befliegung (Fotografie von R. Meister)

7.6.1. Genauigkeitsabschätzung

Ein qualitativer, visueller Vergleich der Klassifikationsresultate mit den ADS40-Bilddaten in voller räumlicher Auflösung (20 cm) weist auf eine hohe Qualität der Ergebnisse hin. Sowohl Lockerschneelawinen in höheren Lagen als auch Nassschneelawinen in tieferen Lagen werden korrekt detektiert. Selbst Lawinenkegel in Schattenhängen werden vom Algorithmus dank der Datendynamik von 12 Bit erkannt.

Für eine quantitative Abschätzung der erreichten Erkennungs- und Kartierungsgenauigkeit, werden innerhalb der drei Testgebiete, auf der Basis der ADS40 Daten mit voller räumlicher Auflösung (20 cm), Bodenreferenzdaten erhoben. Durch visuelle Bildinterpretation werden die von Auge deutlich erkennbaren Lawinenkegel markiert und analog kartiert (vgl. Abbildung 78). Die hohe räumliche und radiometrische Auflösung der Bilddaten erlaubt die Unterscheidung der Lawinenkegel von der angrenzenden, ungestörten Schneefläche selbst in Schattenhängen. Wo GPS-Referenzmessungen vorhanden sind, werden diese bei der Kartierung einbezogen. Weil die Referenzdaten, abgesehen von den GPS-Messungen und den Fotografien, aus dem Basisdatensatz abgeleitet wurden, sind sie nicht unabhängig. Sie werden dennoch verwendet, da für diese Untersuchung keine besseren Referenzdaten mit genügender Abdeckung verfügbar waren und die manuellen Kartierungen der SLF-Beobachter, basierend auf Beobachtungen im Feld, für diese Periode unvollständig und unpräzise sind (erhöhte Lawinengefahr erschwerte das Begehen des Geländes massiv).

Das Hauptinteresse der vorliegenden Untersuchung gilt der Frage, wie viele der total vorhandenen Lawinenkegel vom vorgeschlagenen Algorithmus erkannt werden können. Um diese Frage zu beantworten, werden alle von Auge erkennbaren Lawinenkegel in den drei Testgebieten systematisch indexiert und mit dem Klassifikationsresultat verglichen (vgl. Abbildung 78). Das Verhältnis der korrekt detektierten Kegel zur Anzahl der vorhandenen Kegel wird als Mass für die Erkennungsgenauigkeit verwendet (Detektionsrate). Von 113 Referenzkegeln in den drei Testgebieten werden 106 automatisch erkannt, was einer Detektionsrate von 94% entspricht (Tabelle 19). Diese Detektionsrate kann in der Praxis über ein solch weitläufiges Gebiet durch manuelle Feldbeobachtung wegen der beschränkten Zugänglichkeit der hochalpinen Gebiete und den verfügbaren Kapazitäten an Personen und Zeit, nicht erreicht werden. Diejenigen Kegel, welche nicht automatisch erkannt werden, haben eine Fläche von weniger als 1000 m² und befinden sich in steilem Gelände mit Hangneigungen von 30° und mehr.

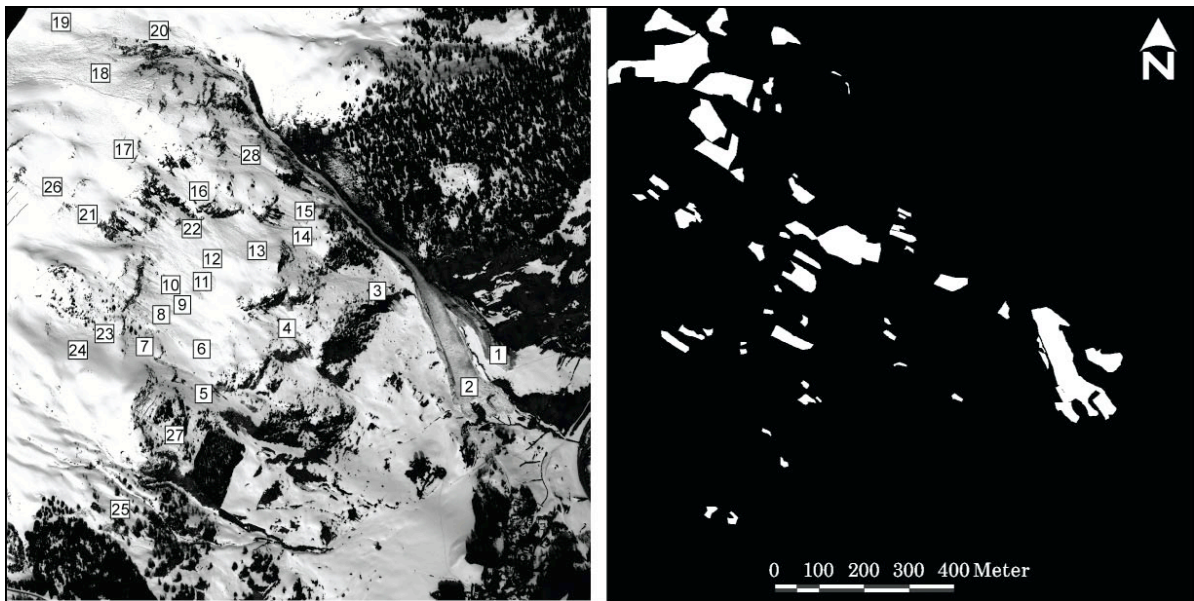


Abbildung 78 Durch visuelle Bildinterpretation erstellte Referenzdaten für die Abschätzung der Erkennungsgenauigkeit (links) und Kartierungsgenauigkeit (rechts, weiss = Lawinenablagerung) am Beispiel des Testgebietes Dorfberg

Nach der Abschätzung der Detektionsgenauigkeit wird zur Bestimmung der Kartierungsgenauigkeit die Ausdehnung jedes einzelnen Lawinenkegels in den Testgebieten auf Basis der räumlich hoch aufgelösten ADS40 Daten manuell digitalisiert (vgl. Abbildung 78, rechts) und Pixel für Pixel mit dem Resultat der Klassifikation verglichen. Weil in dieser Untersuchung nur Lawinenkegel klassiert und keine weiteren Klassen verwendet werden, kann keine aussagekräftige Konfusionsmatrix berechnet werden. Nur das Mass *producer's accuracy* (Formel 26), welches Aufschluss darüber gibt, wie gut eine Klasse richtig kartiert werden kann, ist in dieser Untersuchung anwendbar (Congalton und Green, 1999; Foody, 1992; Foody, 2002).

$$P_b = \frac{x_{bb}}{\sum_{a=1}^i x_{ab}} \times 100 \quad (26)$$

wobei:

x_{bb} = richtig klassierte Pixel der Klasse (b)

x_{ab} = Pixel der Klasse (b) in der Bodenreferenz

Der erreichte *producer's accuracy* Wert für alle Lawinenkegel (Zusammenfassung der Klassen *grosse* und *kleine Kegel*) liegt für das Gesamtgebiet bei einem Wert von 87% (Tabelle 19). Dieses Ergebnis belegt die hohe Genauigkeit der automatischen Kartierung von Lawinenkegeln. Werden die aufgenommenen Bodereferenzlawinen ebenfalls nach der Fläche gruppiert, kann die Kartierungsgenauigkeit für die einzelnen Klassen abgeschätzt werden. Allerdings werden dabei Fehlklassifikationen zwischen den beiden Lawinenkegelklassen als Fehler gewertet. Die Klasse *grosse Kegel* erreicht einen Wert von 89%, die Klasse *kleine Kegel* einen Wert von

19%. Die deutlich schlechtere *producer's accuracy* der kleinen Lawinenablagerungen hat verschiedene Ursachen:

A) Abschnitte von grossen Lawinenkegeln werden als *kleine Kegel* klassiert, wenn die charakteristische Textur auf einem Kegel nicht durchgängig ist.

B) Eine unbestimmte Anzahl kleinerer Lawinenablagerungen kann von Auge nicht einwandfrei identifiziert werden und wird deshalb nicht in den Bodenreferenzdatensatz aufgenommen.

C) In den Randbereichen der kleinen Lawinenkegel im steilen Gelände treten oft Störungen der Schneedecke durch rollende Schneeballen auf. Aufgrund der dadurch entstehenden rauen Oberfläche treten Kartierungsfehlern im Randbereich von kleinen Lawinekegeln auf.

D) Zahlreiche kleinere raue Schneeoberflächen wie künstlich angehäufter Schnee oder Spuren von Tieren und Menschen können vom verwendeten Algorithmus nicht automatisch von kleinen Lawinenablagerungen differenziert werden. Solche Fehlklassifikationen können aber von Experten am Bildschirm manuell mit relativ geringem Zeitaufwand eliminiert werden.

Tabelle 19 Detektionsrate und *producer's accuracy* für die alle Lawinenkegel sowie für die Klassen *grosse Kegel* und *kleine Kegel* innerhalb der einzelnen Testgebiete und für alle drei Testgebiete zusammen (vgl. Abbildung 63, S. 109)

Testgebiet	Detektionsrate	<i>producers's accuracy</i>		
		<i>alle Kegel</i>	<i>grosse Kegel</i>	<i>kleine Kegel</i>
Dorfberg (A)	96%	93%	98%	19%
Casanna (B)	92%	83%	72%	8%
Haupter Tälli (C)	94%	84%	86%	23%
Gesamtgebiet	94%	87%	89%	19%

Der flächenmässig geringe Anteil der Klasse *kleinen Kegel* an der Gesamtfläche aller Lawinenkegel führt dazu, dass die Kartierungsgenauigkeit aller Lawinenkegel durch die geringere Kartierungsgenauigkeit der Klasse *kleine Kegel* nur unwesentlich gemindert wird. Weil im Testgebiet Casanna zahlreiche Fehlklassifikationen zwischen den Klassen *grosse* und *kleine Kegel* vorkommen, erreicht die *producer's accuracy* für die zusammengeführten Klassen gar einen höheren Wert als für die Klasse *grosse Kegel* alleine.

Die erreichten Klassifikationsgenauigkeiten sind im Testgebiet Dorfberg höher als in den beiden hochalpinen Testgebieten. Dies deutet darauf hin, dass die tendenziell grösseren und feuchteren Lawinenkegel in den tieferen Lagen, welche meist Ablagerungselemente mit grösseren Durchmesser bilden, vom verwendeten Algorithmus besser kartiert werden als die kleineren und trockenen Lockerschneelawinen. Im Testgebiet Casanna, welches mit ca. 2300 m ü. M. am höchsten liegt und welches ausschliesslich Lockerschneelawinen enthält, sind die erreichten Werte am schlechtesten.

7.6.2. Grenzen und Fehlerquellen

In natura existieren sehr unterschiedliche Erscheinungsformen von Lawinenkegeln (vgl. Kapitel 2.3.1). Alle Lawinen in einem so grossen Gebiet mit absoluter Sicherheit zu erkennen und präzise zu kartieren ist mit vertretbarem finanziellem und personellem Aufwand nicht möglich. Nachfolgend werden wichtige, mögliche Fehlerquellen, welche bei den einzelnen Klassifikationsschritten auftreten können, aufgezeigt und diskutiert.

7.6.2.1. Bestimmen von nicht lawinengefährdeten Gebieten

Die Annahme, dass Lawinenkegel bei einer Hangneigung von 35° und mehr nicht zum Stillstand kommen, ist nicht uneingeschränkt gültig. Insbesondere kleine Lockerschneerutsche können, in seltenen Fällen, selbst bei Hangneigungen bis zu 40° stehen bleiben. Wird in der Translationszone einer Lawine bereits vereinzelt Material abgelagert, kann diese anhand der charakteristischen Textur erkannt werden (vgl. Abbildung 76, Salezer-Lawine). Der Grossteil dieser Gebiete wird aber, vor allem bei kleineren Lawinen, durch die verwendete Hangneigungsbedingung ausgeschlossen. Auch die Einschränkung der potentiell lawinengefährdeten Flächen mit dem numerischen Modell RAMMS kann zu Fehlern führen (Christen et al., 2008). Abhängig von den Inputparametern können Fehler erster und zweiter Ordnung auftreten. Beide Ausschlusskriterien basieren hauptsächlich auf dem digitalen Geländemodell. Das verwendete DHM25 mit einer räumlichen Auflösung von 25 Metern kann kleinräumige Änderungen in der Oberflächenstruktur nicht vollständig erfassen. Vereinzelt kleinere Kegel wurden vollständig ausgeschlossen und können nicht erkannt werden.

Für Hochgebirgsregionen sind nur vereinzelt räumlich hoch aufgelöste Geländemodelle und kaum verlässliche Lawinensimulationsmodelle verfügbar. In solchen Gebieten kann die vorgeschlagene Prozessierungskette nicht vorbehaltlos angewendet werden. Um die Sensitivität der Methodologie bezüglich den in Kapitel 7.5.1 beschriebenen Ausschlusskriterien zu überprüfen, wird die Prozessierungskette im Testgebiet Davos modifiziert und mit dem Resultat der ursprünglichen Prozessierungskette verglichen. Für eine erste Berechnung werden nur Gebiete mit einer Hangneigung von mehr als 35° ausgeschlossen. Die vom Lawinensimulationsmodell RAMMS identifizierten, ungefährdeten Flächen werden nicht berücksichtigt. In einer zweiten Berechnung werden auch die Steilhänge nicht ausgeschlossen. Die in der ursprünglichen Berechnung als Lawinenkegel ausgeschiedene Gesamtfläche im Testgebiet Davos beträgt $2,132 \text{ km}^2$. Werden nur die Steilhänge ausgeschlossen erhöhte sich diese Fläche um 0.187 km^2 oder 8.7%. Ein Grossteil der Fläche, welche zusätzlich als Lawinenkegel klassiert wird besteht aus überschneiten Eisschollen auf dem Davosersees. Diese Eisschollen zeigen ähnliche Oberflächenstrukturen wie Lawinenkegel. Weitere Fehlklassifikationen treten in der Talsohle auf, weil schneebedeckte Parkplätze und Strassen raue Oberflächenstrukturen aufwiesen. Obwohl vermehrt Fehlklassifikationen auftreten, liefert die Prozessierungskette ohne Einbezug des Lawinenmodells gute Ergebnisse. Werden weder das Modell noch die Hangneigung einbezogen, wächst die als La-

winenkegel klassierte Fläche um 1.494 km² oder 70%. Insbesondere felsdurchsetzte Steilhänge werden fälschlicherweise als Lawinenkegel klassiert. Der Aufwand, diese zahlreichen und über das gesamte Testgebiet verstreuten Fehlklassifikationen manuell zu eliminieren, wäre unverhältnismässig hoch. Der Einsatz der vorgeschlagenen Prozessierungskette, ohne den Einbezug eines digitalen Geländemodells, ist demnach kaum sinnvoll.

7.6.2.2. Analyse der direktionalen Eigenschaften

Ungenauigkeiten in der geometrischen Kalibrierung zwischen den Bildkanälen mit Nadir-Blickrichtung und der Blickrichtung 16° rückwärts führt zu Fehlern bei der Berechnung des NDAI. Weil aber die relative Genauigkeit der verwendeten Kanäle besser als ein Pixel ist (Auskunft F. Schapira, Leica Geosystems), kann der relative geometrische Fehler für diese Untersuchung vernachlässigt werden.

7.6.2.3. Analyse der Textureigenschaften

Nicht nur Lawinenkegel weisen in den NDAI-Bilddaten eine raue Textur auf. Folgende Oberflächentypen zeigen vergleichbare Texturcharakteristika (vgl. Abbildung 79):

- Schneesport-Infrastrukturanlagen wie Skilifte, Pisten oder Lawinenverbauungen (A)
- anthropogen aufgeschütteter Schnee an Rändern von Pisten, Strassen und Wegen (B).
- Raue Schneeoberflächen mit vom Wind geformten Strukturen, wie Sastrugi oder Wächten (C).
- Abfahrts- und Gehspuren im Schnee
- von Gebüsch und kleinen Bäumen durchsetzte Schneeflächen.

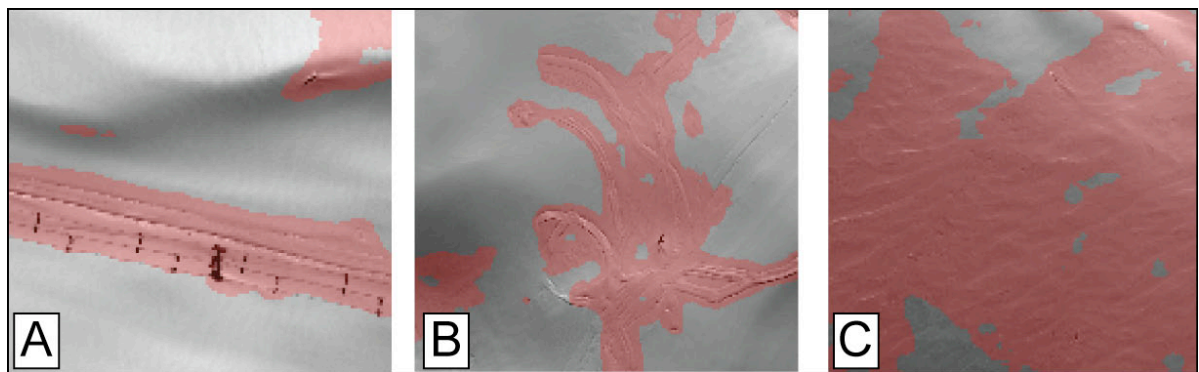


Abbildung 79 Objekte mit ähnlichen Texturcharakteristika wie Lawinenkegel. A) Skilifte, B) künstliche Anhäufungen von Schnee wie Spuren von Pistenfahrzeugen und C) vom Wind geformte Schneeoberflächen

Da die Berechnung der Texturmasse auf der Basis von quadratischen Filterboxen durchgeführt wird (vgl. Kapitel 6.2), tritt in den Randbereichen der Lawinenkegel eine systematische Überschätzung der Fläche auf. Weil aber die meisten Lawinenkegel keine scharfe Begrenzung zeigen, sondern in den Randbereichen unregelmässige Auslaufzonen zeigen, kann dieser Fehler als Annäherung an den realen Aus-

laufbereich betrachtet werden. So wird sichergestellt, dass der gesamte Lawinenkegel, inklusive der Randzone, erfasst wird.

7.6.2.4. Objekt-orientierte Klassifikation

Die Klasse *kleine Kegel* ist deutlich anfälliger für Fehler erster Art (fälschlicherweise als Lawinenkegel klassiert) als die Klasse der *grossen Kegel*. Dies ist einerseits auf die bedeutende Anzahl von kleinen Flächen mit rauer Schneeoberfläche und andererseits auf die räumliche Auflösung der Ausgangsdaten zurückzuführen. Einzelne Objekte wie Buckelpisten, raue, vom Wind geformte Schneeoberflächen oder künstlich aufgeschüttete Schneehaufen können mit der vorgeschlagenen Methode nicht von Lawinenablagerungen unterschieden werden. Dies gilt allerdings auch für die Klasse der *grossen Kegel*. Hingegen können falsch klassierte anthropogene Objekte in einem weiteren Schritt durch den Einbezug von Hilfsdaten (z.B. Vektor25 Daten der swisstopo) oder durch visuelle Qualitätsprüfung eliminiert werden. Fehler zweiter Art (fälschlicherweise nicht als Lawinenkegel klassiert) traten in allen Klassen nur vereinzelt auf, da die verwendete Methodologie sehr sensitiv für raue Schneeoberflächen ist.

7.6.2.5. Meteorologische Limitation

Optische Fernerkundungssensoren werden im Gegensatz zu Radar-Sensoren von der Bewölkung beeinflusst. Bei Nebel oder tief liegender Bewölkung können keine Daten aufgenommen werden, da die elektromagnetischen Wellenlängen in denen optische Systeme aufnehmen ($0.4 - 2,5 \mu\text{m}$), Wolken nicht durchdringen können. Ein flugzeuggestützter Sensor wie die ADS40 kann aber auch unterhalb einer hohen Wolkendecke eingesetzt werden. Allerdings wird das in der Prozessierungskette verwendete direktionale Signal der Lawinenkegel und der ungestörten Schneedecke durch die diffuse Strahlungssituation unter einer Wolkendecke abgeschwächt.

Weil Lawinenniedergänge gehäuft nach ergiebigen Schneefällen mit einhergehender dichter Bewölkung auftreten (McClung und Schaerer, 2006), ist die Einschränkung der vorgestellten Methode durch Wolken besonders entscheidend und wird im Folgenden analysiert. Für eine Abschätzung, inwiefern die Erfassung von Lawinenniedergängen mit flugzeuggestützten, optischen Fernerkundungsdaten durch die Bewölkung eingeschränkt wird, werden die kontinuierlichen meteorologische Messungen der letzten zehn Winter (November bis April der Saisons 1998/99 bis 2007/08), erhoben an der Station Weissfluhjoch (2693 m ü. M.), analysiert (Datenquelle: Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie). Als Indikator für eine erhöhte Lawinenaktivität wird das Ereignis einer akkumulierten Neuschneesumme von mehr als 20 cm verwendet, da eine derartige Belastung der Schneedecke durch Neuschnee als wichtiger Auslöser für Lawinen gilt (Munter, 2003). Als Indikator für die Möglichkeit, an einem bestimmten Tag ein Flugzeug zur Bilddatenerfassung einzusetzen, wird ein Auftreten von mindestens fünf Stunden Sonnenschein innerhalb einer Periode von weniger als 10 Tagen nach dem Neuschneefall gewählt (vgl. Abbildung 80). Für beide Indikatoren sind kontinuierliche Messungen der Station Weissfluhjoch verfügbar. Eine potentielle La-

winenperiode wird als abgeschlossen betrachtet, wenn erneuter Schneefall eintritt, da überschneite Lawinenkegel kaum mehr detektiert werden können. Bei den verwendeten Daten handelt es sich um Indikatoren, welche deutliche Abweichungen gegenüber der realen Situation aufweisen können.

Die statistische Auswertung der Messreihen vom Weissfluhjoch anhand dieser Indikatoren zeigt, dass bei Annahme der Bewölkung als alleinigem, limitierendem Faktor, 90% der berechneten Lawinenperioden mit optischen Fernerkundungssensoren erfasst werden könnten. Obwohl die limitierenden Annahmen nur eine grobe Abschätzung erlauben, zeigte das Resultat ein höheres Potential für die Aufnahme optischer Fernerkundungsdaten im Gebirge, als gemeinhin, wegen der Bewölkung, erwartet wird (Ju und Roy, 2008).

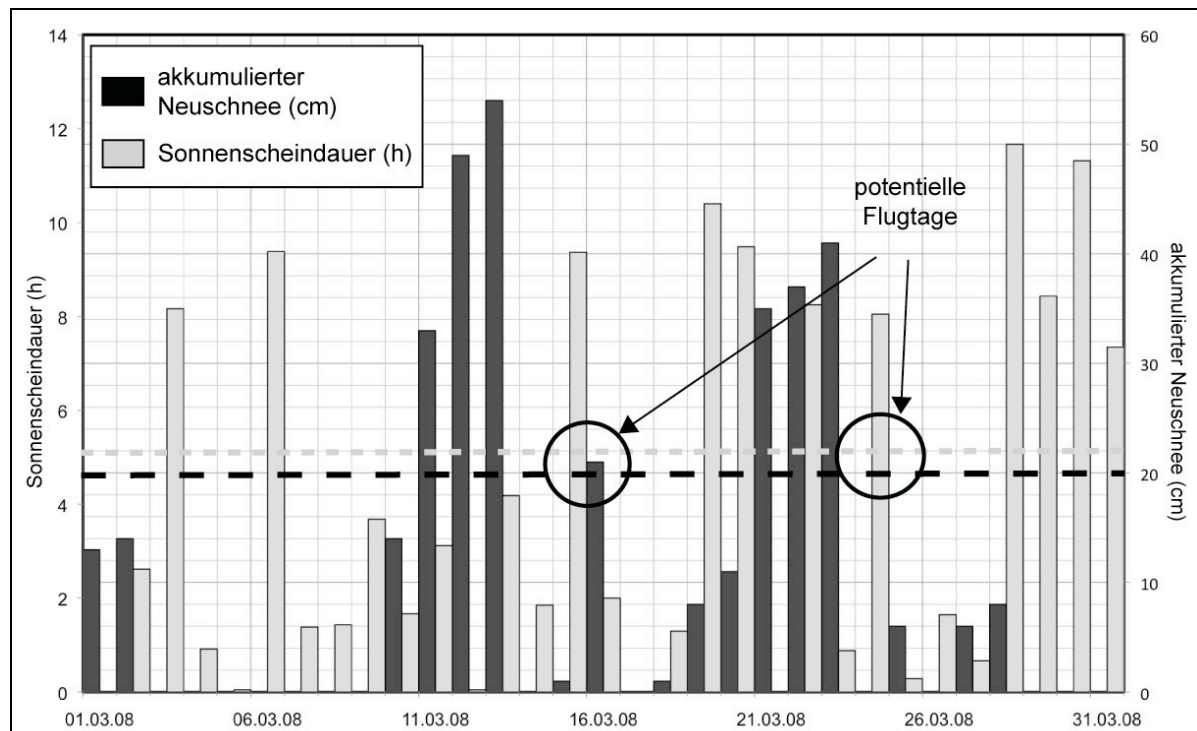


Abbildung 80 Statistische Modellierung zur Abschätzung potentieller Flugtage am Weissfluhjoch für den Monat März 2008, welche die Datenerfassung für eine Detektierung von Lawinenablagerungen ermöglichen

7.7. Schlussfolgerungen

Räumlich und radiometrisch hoch aufgelöste Fernerkundungsdaten von optischen, abbildenden Sensoren sind geeignet, Lawinenkegel unterschiedlicher Grösse zu erkennen und zu kartieren. Mit der vorgeschlagenen Prozessierungskette, welche Informationen über die Direktionalität, die Textur und die spektralen Eigenschaften von Lawinenkegeln kombiniert, kann der Grossteil der Ablagerungen im Testgebiet korrekt erfasst werden. Sowohl grosse Tallawinen wie auch kleinere bis mittlere Hanglawinen werden erkannt; dies gilt auch für Gebiete im Schatten.

Die Hypothese aus Kapitel 7.2 Seite 108 wird durch diese Untersuchung bestätigt. Aufgrund der flächendeckenden Informationsgewinnung kann diese Methode die bestehenden Punktmessungen in schlecht zugänglichen Regionen substantiell er-

gänzen und übertreffen. Limitierungen der Methode sind hauptsächlich durch die Verfügbarkeit der fernerkundlichen Bilddaten infolge schlechten Wetterbedingungen sowie durch einzelne Fehlklassifikationen von rauen Schneeoberflächen, künstlichen oder natürlichen Ursprungs gegeben. Je kleiner die Lawinenkegel sind, desto grösser wird die Gefahr dass sie vom vorgeschlagenen Algorithmus nicht erkannt werden. Zudem existieren zahlreiche kleinräumige raue Oberflächen, welche fälschlicherweise als kleine Lawinenkegel klassiert werden.

Die Verwendung eines räumlich besser aufgelösten digitalen Geländemodells könnte einen Teil der Fehlklassifikationen verhindern. Allerdings existieren digitale Höhendaten der geforderten Qualität für den Raum Davos zurzeit nicht. Ausgehend von den automatisch detektierten Lawinenkegeln können Experten bei den meisten Lawinen den Anriss und das Translationsgebiet durch visuelle Interpretation der flugzeuggestützten Scannerdaten erkennen. Weitere Untersuchungen müssen zeigen, ob dieser Prozess weiter automatisiert werden kann.

Um die Resultate dieser Untersuchung zu erhärten, muss die hier entwickelte Methodologie in weiteren Regionen getestet werden. Weil in dieser Untersuchung gezeigt werden konnte, dass eine räumliche Auflösung von einem Meter genügt, sollte der vorgeschlagene Ansatz auch an Daten von satellitengestützten Sensoren mit richtungaler Aufnahmekapazität getestet werden (z.B. QuickBird, IKONOS). Von besonderem Interesse ist der Einsatz von hochauflösenden SAR-Sensoren (TerraSAR-X, Cosmo-Skymed, Radarsat-2) weil der Einsatz dieser Sensoren nicht durch Wetterbedingungen limitiert sind. Allerdings schmälern geometrische Effekte wie *layover*, Radarschatten und *foreshortening* das Potential dieser Sensoren im Hochgebirge.

Kapitel 8

Fazit und Ausblick

8.1. Fazit

Eine systematische und flächendeckende Erfassung von Lawinenereignissen aller Grössenordnungen ist eine wichtig Voraussetzung für die umfassende Evaluation von Lawinengefahrenprognosen, die Verbesserung von Gefahrenkarten, die Ergänzung von Lawinenkatastern, die Entscheidungsfindung zur Freigabe von Skipisten und Strassen in kritischen Lawinensituationen sowie für die Evaluation und Kalibrierung von Lawinenmodellen. Berggebiete sind, speziell im Winter, oft nicht oder nur schwer zugänglich. Eine systematische Erfassung von Lawinenniedergängen durch Beobachter im Feld ist sehr aufwändig. Heute wird deshalb nur ein Bruchteil aller Lawinenereignisse erfasst. Fernerkundungssensoren bieten heute die Möglichkeit gerade in diesen unzugänglichen Gelände flächendeckende Informationen aufzuzeichnen und eine Grundlage für eine integrale Gelände-, beziehungsweise Gefahrenanalyse zu liefern.

Das Ziel dieser Arbeit war die Entwicklung einer Methode zur systematischen und synoptischen Erkennung und Kartierung von Lawinenablagerungen mit räumlich hochauflösenden Fernerkundungsdaten im Schweizer Alpenraum. Um dieses Ziel zu erreichen, wurden die spektralen, direktionalen und texturalen Eigenschaften von Lawinenkegeln und der angrenzenden, ungestörten Schneedecke untersucht und geeignete Parameter zur Differenzierung evaluiert. Die gewonnen Erkenntnisse wurden in einer Prozessierungskette zur Erkennung von Lawinenablagerungen in hochauflösenden abbildenden Fernerkundungsdaten kombiniert und mit einem Datensatz eines flugzeuggestützten Bildscanners im Raum Davos überprüft.

8.1.1. Charakterisierung der spektralen Eigenschaften

Die Form und Intensität der Spektralkurven von Lawinenkegeln und der gestörten Schneedecke sind sich sehr ähnlich. Die Spektren der Lawinenkegel weisen eine hohe Variabilität auf, was die Identifikation von aussagekräftigen lawinenkegelspezifischen Charakteristika erschwert. Die Hauptkomponententransformation PCT der Feld-Spektrometernmessungen (Wellenlängenbereich 350 bis 2500 nm) von neun Lawinenkegeln aus dem Raum Davos lassen aber eine Einteilung der gemessenen Lawinenkegel anhand der ersten beiden Hauptkomponenten in drei Gruppen zu: Frische oder leicht überschneite Kegel, Kegel von Nassschneelawinen und verschmutzte Lawinenkegel. Die statistische Analyse der durch das *continuum removal* Verfahren normalisierten Spektren zeigt, dass signifikante Unterschiede in der Tiefe und Fläche von Absorptionsfeatures bei 1020 nm, 1220 nm und 1500 nm bestehen. Eine Klassifikation der Stichproben anhand der Tiefe und

Fläche der drei Absorptionsfeatures resultiert in einer Gesamtgenauigkeit von 86%, sofern alle Spektren einbezogen werden. Diese Erkenntnisse müssen aber noch durch weitere Spektroradiometermessungen unterschiedlicher Lawinenkegeltypen bestätigt werden. Die gefundenen Unterschiede sind meist sehr klein und schwierig zu identifizieren. Zudem werden die Messungen durch variierende Messbedingungen beeinflusst. Eine Nutzung dieser spektralen Unterschiede zur Unterscheidung von Lawinenkegeln von der angrenzenden ungestörten Schneedecke mit flugzeug- oder satellitengestützten Fernerkundungssensoren ist daher nach Einschätzung des Autors kaum möglich.

8.1.2. Charakterisierung der direktionalen Eigenschaften

Lawinenkegel und die angrenzende, ungestörte Schneedecke verhalten sich in ihren direktionalen Reflexionseigenschaften konträr, obwohl beide aus nahezu demselben Material bestehen. Während die vergleichsweise glatte Oberfläche der ungestörten Schneedecke ein von der Vorwärtsstreuung dominiertes Reflexionsverhalten aufweist, zeigt die vergleichsweise raue Oberfläche von Lawinenkegeln ein durch die Rückwärtsstreuung dominiertes Verhalten. Optische Fernerkundungsdaten, aufgenommen aus unterschiedlichen Blickwinkeln, haben deshalb für die Erkennung und Kartierung von Lawinenablagerungen ein grosses Potential, insbesondere wenn sie nach der Sonnenhauptebene ausgerichtet aufgezeichnet wurden. Allerdings wird ein Blickwinkelunterschied der Aufzeichnungen von deutlich mehr als 16° benötigt, um Lawinenkegel allein auf den direktionalen Eigenschaften basierend von der ungestörten Schneedecke zu unterscheiden. Der Beweis, dass dieser Ansatz mit flugzeug- oder satellitengestützten Sensoren in der Praxis funktioniert, muss noch erbracht werden.

8.1.3. Charakterisierung der Textureigenschaften

Lawinenkegel können aufgrund ihrer charakteristischen Textur von blossen Auge gut von der angrenzenden, ungestörten Schneedecke unterschieden werden. Für die automatisierte Erfassung der charakteristischen Textureigenschaften in den digitalisierten Daten hat sich der Ansatz der Statistik zweiter Ordnung (*second order statistic*) als besonders geeignet erwiesen. Eine systematische Evaluation der unterschiedlichen Texturmasse mit den zugehörigen Steuerparametern Filterboxgrösse, Richtung und Distanz hat ergeben, dass das Mass *Entropy* die besten Trennbarkeit zwischen Lawinenkegeln und der ungestörten Schneedecke ermöglicht. Die Textur ist ein aussagekräftiger Indikator für die Oberflächenrauigkeit der Schneedecke und eignet sich deshalb für die automatisierte Erkennung und Kartierung von Lawinekegeln. Allerdings weisen auch andere Schneeoberflächen, wie vom Wind modellierte Schneedecken oder anthropogen aufgeschüttete Schneemassen, raue Oberflächenstrukturen auf. Deshalb reichen Texturinformationen für die eindeutige Erkennung und Klassifikation von Lawinenkegeln allein nicht aus. Es müssen zusätzliche Informationen miteinbezogen werden.

8.1.4. Anwendung

Mit den in den vorangegangenen Kapiteln gewonnenen Erkenntnissen wurde eine Prozessierungskette entwickelt, welche spektrale und direktionale Informationen sowie Texturinformationen aus den Bilddaten mit verfügbaren Hilfsdaten (DHM, Lawinenmodelle) kombiniert. Diese Prozessierungskette wurde mit Daten des flugzeuggestützten Scanners ADS40, im Raum Davos getestet und evaluiert. 94% aller vorhandenen Lawinen konnten durch den Algorithmus automatisch detektiert werden. Die Kartierungsgenauigkeit der grossen Lawinenkegel (Fläche $\geq 2000 \text{ m}^2$), auf denen der Fokus dieser Arbeit liegt, fiel mit einer *producer's accuracy* von 89% ebenfalls gut aus. Die grossen Kegel von Nass- und Lockerschneelawinen in unterschiedlichen Höhenlagen wurden korrekt identifiziert und auch kartiert. Selbst Lawinenkegel in Schattenhängen wurden erfasst. Allerdings traten vereinzelte Fehlklassifikationen auf. Insbesondere vom Wind modellierte Schneedecken, anthropogen angehäuften Schneemassen an Strassen- oder an Pistenrändern und von spärlicher Vegetation durchsetzte Gebiete konnten vom Algorithmus nicht automatisch von Lawinenkegeln unterschieden werden. Diese Fehlklassifikationen sind jedoch mittels zusätzlichen Informationen wie die Nutzung und Ausdehnung der Skigebiete deutlich reduzierbar und können auch durch eine schnell ausführbare manuelle Korrektur eliminiert werden. Allerdings können dadurch Lawinen, welche in den ausmaskierten Gebieten niedergehen nicht detektiert werden. Kleinere Lawinenkegel werden vom Algorithmus ebenfalls gut detektiert. Allerdings ist die Kartierungsgenauigkeit dieser Kegel deutlich schlechter, als bei den grossen Kegeln.

Diese Ergebnisse zeigen, dass der in dieser Arbeit entwickelte Ansatz für die grossflächige, automatisierte Erkennung und Kartierung von Lawinenablagerungen geeignet ist und eine wertvolle Ergänzung zu den bestehenden in situ Beobachtungen, vor allem in unzugänglichen Gebieten, darstellt. Allerdings muss der Ansatz noch in weiteren Gebieten und mittels Daten anderer Sensoren getestet werden, um dessen Stabilität zu belegen. Ein operationeller Einsatz der vorgestellten Methode zur Erkennung und Kartierung von Lawinen wird heute vor allem noch durch die mangelnde Datenverfügbarkeit, hauptsächlich verursacht durch Wolkenbedeckung und die wenigen im Einsatz stehenden Sensoren sowie die benötigte Zeit für die Datengewinnung und Datenauswertung erschwert bis verunmöglicht. Mit der steigenden Verfügbarkeit geeigneter Sensorsysteme und der Weiterentwicklung der Prozessierungsketten könnten diese Einschränkungen in naher Zukunft aber überwunden werden.

8.2. Ausblick

Die in dieser Arbeit entwickelte Methodologie hat ein grosses Potential für die flächendeckende und systematische Erhebung der Lage und Ausdehnung von Lawinenablagerungen, insbesondere in abgelegenen Regionen. Grundsätzlich liegt es im Bereich des Möglichen, eine operationelle Lawinenerkennung und Kartierung auf Basis dieses Ansatzes zu entwickeln. Allerdings müsste die Verfügbarkeit

von geeigneten optischen Sensoren deutlich gesteigert, die Aufnahme- und Verarbeitungskosten (vgl. Tabelle 20) gesenkt, die Prozessierung der Rohdaten beschleunigt und eine vollautomatisierte und optimierte Prozessierungskette entwickelt werden. Dann wären die Fernerkundungsprodukte für die Verbesserung und Unterstützung der operationellen Lawinenprognostik und Lawinenwarnung von Nutzen. Es ist durchaus möglich, dass diese Bedingungen in Zukunft erfüllt werden. Neue, räumlich hochauflösende Erdbeobachtungssatelliten und die wachsende Verbreitung von flugzeuggestützten optischen Scannern steigern die potentielle Verfügbarkeit (Kramer, 2002; PREVIEW, 2008). An der Reduktion der benötigten Prozessierungszeit und der Prozessierungskosten wird in der Industrie intensiv gearbeitet (Gianinetto und Scaioni, 2008; Leica, 2008; Woodell et al., 2006). Die Einschränkung, dass nur bei schönem Wetter Daten erhoben werden können, bleibt aber bei optischen Sensoren bestehen.

Tabelle 20 Abschätzung des Zeitaufwandes und der Kosten für die Datenerhebung und deren Auswertung mit einem ADS40 Sensor für ein Gebiet von ca. 100 km² im Schweizer Alpenraum (mündliche Auskunft S. Bovet, swisstopo)

	Zeitaufwand	Kosten
Befliegung:	ca. 0,5 Tage	CHF 20'000
Vorverarbeitung (zu Level 2):	<i>rapid mapping</i> Priorität: 1,5 Tage normale Priorität: 5 – 10 Tage	CHF 3'000
Prozessierungskette:	ca. 1 Tag	CHF 2'000
Total:	ca. 3 bis 11,5 Tage	CHF 25'000

Insbesondere in Gebirgsregionen von Entwicklungsländern, wo bis anhin kaum Daten über das Auftreten von Lawinenereignissen erhoben worden sind, können Fernerkundungssensoren und die entwickelte Methode zur Schliessung bedeutender Informationslücken zur lokalen Lawinenaktivität beitragen. In den Alpen entwickelte und kalibrierte Lawinensimulationstools wie RAMMS können somit besser für diese Regionen adaptiert und für Gefahrenkartierungen und die Siedlungsplanung eingesetzt werden. Die Übertragbarkeit der Methode auf Gebirgsregionen mit unterschiedlichen topographischen, klimatischen und meteorologischen Eigenschaften muss aber erst noch in Gebirgen wie dem Himalaja oder den Rocky Mountains evaluiert werden.

Nach Einschätzung des Autors kann die in dieser Arbeit entwickelte Methode auch in anderen Gebieten und während der gesamten schneereichen Periode angewendet werden. Weil der Algorithmus auch Lawinekegel in Schattenhängen erkennt, kann angenommen werden, dass er auch bei tiefem Sonnenstand brauchbare Resultate liefert. Ist kein Lawinensimulationstool zur Ausmaskierung nicht gefährdeter Gebiete verfügbar, treten nur vereinzelte zusätzliche Fehlklassifikationen auf. Auf ein präzises Geländemodell für die Georeferenzierung und die Ausmaskierung von Steilhängen kann aber nicht verzichtet werden. Die Untersuchungen in dieser Arbeit haben gezeigt, dass auch ältere und sogar leicht überschneite Lawinenkegel detektiert werden können. Ist die charakteristische Textur

einer alten oder stark überschneiten Lawinenablagerung durch meteorologische Einflüsse abgebaut und nicht mehr sichtbar, kann sie vom vorgeschlagenen Algorithmus aber nicht mehr detektiert werden. Deshalb ist es wichtig, dass die Bilddaten innerhalb weniger Tage nach Lawinenperioden und insbesondere vor dem nächsten Schneefall akquiriert werden.

Räumlich hoch auflösende Satellitenbildsensoren mit multiangularer Aufnahmemöglichkeit (QuickBird, IKONOS oder WorldView-1) sind für die Lawinererkennung und Kartierung ebenfalls sehr interessant. Dank ihren grösseren Aufnahmestreifen (*swath width*) sind vor allem die satellitengestützten Sensoren eine vielversprechende Alternative zu den flugzeuggestützten Sensoren. Veränderte Sensorkonfigurationen (v.a. Beobachtungswinkel) machen aber Anpassungen an der Prozessierungskette nötig. Deshalb muss die in dieser Arbeit entwickelte Methode erst noch mit Daten solcher Sensoren aus Gebirgsregionen getestet und deren Eignung evaluiert werden.

Ein optimaler optischer Sensor für die Lawinenforschung verfügt über unterschiedliche Blickwinkel (ca. 45° vorwärts, Nadir, ca. 45° rückwärts), eine räumliche Auflösung von ungefähr einem Meter, eine möglichst grosse Streifenbreite (*swath width*), eine radiometrische Auflösung von mindestens 12 Bit und Spektralkanäle im Bereich des VIS, NIR und SWIR. Besonders hilfreich wäre ein Spektralband im Bereich von 1,03 μm , weil dieser Bereich ideal für die Erhebung der Korngrösse ist (Warren, 1982).

Radar-Sensoren verfügen im Vergleich zu den optischen Bildsensoren über den wichtigen Vorteil, die Erdoberfläche auch bei Bewölkung erfassen zu können. Mit den Sensorsystemen TerraSAR-X, Cosmo-Skymed und Radarsat-2 sind zurzeit bereits drei Systeme im Orbit, welche räumliche Auflösungen von ca. einem Meter erreichen. Diese Sensoren sind für die Erkennung von Lawinenablagerungen sehr interessant da sie sensitiv auf die Oberflächenrauigkeit reagieren. Der Einsatz von SAR-Sensoren wird aber im Hochgebirge von Effekten wie *foreshortening*, *layover* und Radarschatten beeinträchtigt. Geeignete Methoden für die Erkennung und Kartierung von Lawinenablagerungen mit räumlich hochauflösende SAR-Sensoren im Alpen Raum müssen aber erst noch identifiziert und evaluiert werden. Wiesmann et al.(2001) publizierten mit einer *change detection* Analyse von ERS-Daten eine erste Untersuchung in dieser Richtung.

Für verschiedene Anwendungen in der Schnee- und Lawinenforschung sind weitere, mit Fernerkundungssensoren potentiell erfassbare Elemente von Lawinen von wesentlichem Interesse. Dies sind primär die Lage und Ausdehnung der Anriss- und Translationsgebiete sowie die Ableitung von Ablagerungsvolumen. Aber auch Informationen über die räumliche Variabilität der Schneedecke sind vor allem für die Entstehung von Lawinen von grossem Interesse (Schweizer et al., 2008). Die Erhebung dieser Informationen flächendeckend über grosse Gebiete würde die gängigen, isolierten in situ Messungen substantiell ergänzen. Zukünftige Arbeiten sollen zeigen, ob und wie diese Elemente parametrisiert und mittels Fernerkundungssensoren mit genügender Präzision erhoben werden können.

Ob die entwickelte Methodologie basierend auf der Kombination von spektralen- und direktionalen Informationen sowie Texturinformationen auch zur Detektion von weiteren gravitativen Prozessen wie Murgänge oder Erdrutsche eingesetzt werden, kann muss noch erforscht werden. Dazu wäre aber eine systematische Evaluation geeigneter Bilddaten unterschiedlicher Sensoren sowie substantielle Modifikationen der Prozessierungskette nötig.

Die vorliegende Arbeit demonstriert, dass Fernerkundungsdaten die vorhandenen in situ Messungen substantiell ergänzen können. Das Interesse am vorgestellten Ansatz seitens der SLF Forschungseinheiten „*Warnung- und Prävention*“ sowie „*Lawinen, Murgänge, Steinschläge*“ zeigt, dass die Bereitschaft für den Einbezug von Daten von flugzeug- und satellitengestützten Sensoren für die Schnee- und Lawinenforschung stetig wächst. Die Chancen, dass eine optimierte Version des in dieser Arbeit entwickelten Ansatzes in Zukunft von Lawinenwarndiensten eingesetzt wird, stehen deshalb nach Einschätzung des Autors gut.

Literatur

- Abousleman, G.P., Gifford, E. und Hunt, B.R., 1994. Enhancement and Compression Techniques for Hyperspectral Data. *Optical Engineering*, 33(8): 2562-2571.
- Ammann, W.J., 2003. Lawinen - die dominierende Naturgefahr im Alpenraum. Heidelberg Geographische Gesellschaft HGG, 18: 41 - 50.
- Analytical Spectral Devices Inc., 2007. Technical Guide, Analytical Spectral Devices Inc., Boulder, CO.
- ASPRS, 2001. Digital elevation model technologies and applications : the DEM users manual. American Society for Photogrammetry and Remote Sensing.
- BABS, 2003. Katarisk: Katastrophen und Notlagen in der Schweiz - Eine Risikobeurteilung aus Sicht des Bevölkerungsschutzes, Bundesamt für Bevölkerungsschutz, Departement für Verteidigung, Bevölkerungsschutz und Sport VBS.
- Bahrenberg, G., Giese, E. und Nipper, J., 1990. Statistische Methoden in der Geographie, 1, Stuttgart.
- Bajcsy, P. und Groves, P., 2004. Methodology for hyperspectral band selection. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 70(7): 793-802.
- Barnsley, M.J., Barr, S.L. und Tsang, T., 1997. Scaling and generalisation in land cover mapping from satellite sensors. In: P. Van Gardingen, G. Foody and P. Curran (Editors), *Scaling-up, from cell to landscape*. Cambridge University Press, pp. 173 - 200.
- Bartelt, P., Salm, B. und Gruber, U., 1999. Calculating dense-snow avalanche runout using a Voellmy-fluid model with active/passive longitudinal straining. *Journal of Glaciology*, 45(150): 242 - 254.
- Beisel, U., 2006. Absolute radiometric calibration of the ADS40 Sensor. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XXXVI(part 1).
- Benz, U.C., Hofmann, P., Willhauck, G., Lingenfelder, I. und Heynen, M., 2004. Multi-resolution, object-oriented fuzzy analysis of remote sensing data for GIS-ready information. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 58: 239 - 258.
- Bessis, J.L., Béquignon, J. und Mahmood, A., 2004. Three typical examples of activation of the International Charter "space and major disasters". *Advances in Space Research*, 33(3): 244-248.
- Bhattacharyya, A., 1943. On a measure of divergence between two statistical populations defined by probability distributions. *Bulletin of the Calcutta Mathematical Society*, 35: 99 - 110.
- Bonn, F. und Dixon, R., 2005. Monitoring Flood Extent and Forecasting Excess Runoff Risk with RADARSAT-1 Data. *Natural Hazards*, 35(3): 377-393.
- Briottet, X., 2004. Fundamentals of bi-directional reflectance and BRDF modeling. In: M. Schoenermark, B. Geiger and H.P. Roeser (Editors), *Reflection Properties of Vegetation and Soil*. Wissenschaft und Technik Verlag, Berlin, pp. 31 - 38.

- Brugger, H. et al., 2007. The impact of avalanche rescue devices on survival. *Resuscitation*, 75: 476 - 483.
- Bründl, M. et al., 2004. IFKIS – a basis for managing avalanche risk in settlements and on roads in Switzerland. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 4: 257 - 262.
- Budmiger, G. und Budmiger, K., 2000. Von Schnee und Lawinen, von Luft- und Orthobildern. *Vermessung, Photogrammetrie, Kulturtechnik*, 98(9): 540 - 545.
- Buehler, Y. und Kellenberger, T., 2007. Development of processing chains for rapid mapping with satellite data In: J. Li, S. Zlatanova and A. Fabbri (Editors), *Geomatics Solutions for Disaster Management*. Springer, Berlin, pp. 49 - 60.
- Buehler, Y.A., Kellenberger, T.W., Small, D., Itten, K.I. und 2006. Rapid mapping with remote sensing data during flooding 2005 in Switzerland by object-based methods – a case study. In: J.F. Martin-Duque, C.A. Brebbia, D.E. Emmanouloudis and U. Mander (Editors), *Geo Environment & Landscape Evolution II*. WIT Press, pp. 391 - 400.
- Bühler, Y., Hüni, A., Christen, M., Meister, R. und Kellenberger, T., 2009. Automated detection and mapping of avalanche deposits using airborne optical remote sensing data. *Cold Regions Science and Technology*, 57(2): 99 - 106.
- Bühler, Y., Kneubuehler, M., Bovet, S. und Kellenberger, T., 2007. Anwendung von ADS40 Daten im Agrarbereich, Dreiländertagung SGPBF, DGPF & OVG, Muttenez, Switzerland.
- Buser, O., 1983. Avalanche Forecast with the Method of Nearest Neighbors - an Interactive Approach. *Cold Regions Science and Technology*, 8(2): 155-163.
- CAA, 2002. Observation guidelines and recording standards for weather, snowpack and avalanches, Canadian Avalanche Association (CAA), Revelstoke, BC.
- Caridade, C., A., M. und Mendonca, T., 2008. The use of texture for image classification of black & white air photographs. *International Journal of Remote Sensing*, 29(2): 593 - 607.
- Casacchia, R. et al., 2001. Radiometric investigation of different snow covers in svalbard. *Polar Research*, 20(1): 13.
- Champion, I., Dubois-Fernandez, P., Guyon, D. und Cottrel, M., 2008. Radar image texture as a function of forest stand age. *International Journal of Remote Sensing*, 29(6): 1795-1800.
- Chen, D.W., Sengupta, S.K. und Welch, R.M., 1989. Cloud Field Classification Based Upon High Spatial-Resolution Textural Features .2. Simplified Vector Approaches. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 94(D12): 14749-14765.
- Chen, Y.Q., Nixon, M.S. und Thomas, D.W., 1997. On texture classification. *International Journal of Systems Science*, 28(7): 669-682.
- Christen, M., Bartelt, P. und Gruber, U., 2002. AVAL-1D: An Avalanche Dynamics Program for the Practice, INTERPRAEVENT 2002 in the Pacific Rim, MATSUMOTO / JAPAN pp. 715 - 725.
- Christen, M., Bartelt, P., Kowalski, J. und Stoffel, L., 2008. Calculation of dense snow avalanches in three-dimensional terrain with the numerical simulation program RAMMS, ISSW international snow science workshop, Whistler, CA.

- Clark, R.N. und Roush, T.L., 1984. Reflectance Spectroscopy - Quantitative-Analysis Techniques for Remote-Sensing Applications. *Journal of Geophysical Research*, 89(Nb7): 6329-6340.
- Clausi, D.A., 2002. An analysis of co-occurrence texture statistics as a function of grey level quantization. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 28(1): 45-62.
- Coggins, J.M., 1982. A Framework for Texture Analysis Based on Spatial Filtering. PhD Thesis, Michigan State University, East Lansing
- Colbeck, S.C. et al., 1990. The International Classification for Seasonal Snow on the Ground, International Commission on Snow and Ice.
- Congalton, R.G. und Green, K., 1999. Assessing the accuracy of remotely sensed data: Principles and practices. Lewis Publishers, Boca Raton
- Connors, R.W., Mcmillin, C.W., Lin, K. und Vasquezespinoza, R.E., 1983. Identifying and Locating Surface-Defects in Wood - Part of an Automated Lumber Processing System. *Ieee Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 5(6): 573-583.
- Curran, P.J., Dungan, J.L. und Peterson, D.L., 2001. Estimating the foliar biochemical concentration of leaves with reflectance spectrometry testing the Kokaly and Clark methodologies. *Remote Sensing of Environment*, 76(3): 349-359.
- Daubechies, I., Mallat, S. und Willsky, A.S., 1992. Special Issue on Wavelet Transforms and Multiresolution Signal Analysis - Introduction. *Ieee Transactions on Information Theory*, 38(2): 529-531.
- de Ruyter de Wildt, M., Seiz, G. und Gruen, A., 2007. Operational snow mapping using multitemporal Meteosat SEVIRI imagery. *Remote Sensing of Environment*, 109(1): 29-41.
- Definiens, 2007. Definiens Developer 7 user guide and reference book, Munich.
- Dekker, R.J., 2003. Texture Analysis and Classification of ERS SAR Images for Map Updating of Urban Areas in The Netherlands. *Ieee Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 41(9): 1950 - 1958.
- Delenne, C. et al., 2008. Textural approaches for vineyard detection and characterization using very high spatial resolution remote sensing data *International Journal of Remote Sensing*, 29(4): 1153 - 1167.
- Despan, D. und Jacquemoud, S., 2004. Fundamentals of bi-directional reflectance and BRDF modeling. In: M. Schoenermark, B. Geiger and H.P. Roeser (Editors), *Reflection Properties of Vegetation and Soil*. Wissenschaft und Technik Verlag, Berlin, pp. 31 - 70.
- Dewaele, P., Van Gool, P. und Oosterlinck, A., 1988. Texture Inspection with Self-Adaptive Convolution Filters, *International Conference on Pattern Recognition*, Rome, Italy, pp. 56 - 60.
- Dikshit, O., 1996. Textural classification for ecological research using ATM images. *International Journal of Remote Sensing*, 17(5): 887-915.
- Dozier, J., 1989. Spectral signature of alpine snow cover from the landsat thematic mapper. *Remote Sensing of Environment*, 28: 9-22.

- Dozier, J. und Painter, T.H., 2004. Multispectral and hyperspectral remote sensing of alpine snow properties. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 32: 465-494.
- Estes, J., Hajic, E. und Tinney, R., 1983. *Manual of Remote Sensing*. Manual of Remote Sensing, 1. American Society of Photogrammetry.
- Etter, H.-J., Stucki, T., Zweifel, B. und Peielmeier, C., 2008. Developments in avalanche forecasting and other prevention measures and the potential effect on avalanche fatalities, *International Snow Science Workshop ISSW*, Whistler, BC, CA.
- Evans, D.L., Farr, T.G. und Vanzyl, J.J., 1992. Estimates of Surface-Roughness Derived from Synthetic Aperture Radar (Sar) Data. *Ieee Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 30(2): 382-389.
- Fahrmeir, L., Künstler, R., Pigeot, I. und Tutz, G., 2007. *Statistik*, 6. Springer, Berlin, 610 pp.
- Fily, M., Bourdelles, B., Dedieu, J.P. und Sergent, C., 1997. Comparison of in situ and Landsat Thematic Mapper derived snow grain characteristics in the Alps. *Remote Sensing of Environment*, 59(3): 452-460.
- Foody, G.M., 1992. On the Compensation for Chance Agreement in Image Classification Accuracy Assessment. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 58(10): 1459-1460.
- Foody, G.M., 2002. Status of land cover classification accuracy assessment. *Remote Sensing of Environment*, 80(1): 185-201.
- Foppa, N., Stoffel, A. und Meister, R., 2007. Synergy of in situ and space borne observation for snow depth mapping in the Swiss Alps. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 9(3): 294-310.
- Furdada, G. et al., 1995. Avalanche Mapping and Related Gis Applications in the Catalan-Pyrenees. *Surveys in Geophysics*, 16(5-6): 681-693.
- Gabet, L., Giraudon, G. und Renouard, L., 1997. Automatic generation of high resolution urban zone digital elevation models. *Isprs Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 52(1): 33-47.
- Galvao, L.S., Formaggio, A.R., Couto, E.G. und Roberts, D.A., 2008. Relationships between the mineralogical and chemical composition of tropical soils and topography from hyperspectral remote sensing data. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 63(2): 259-271.
- Ghini, A. und Chung, C.J., 2005. STARTER: A statistical GIS-based model for the prediction of snow avalanche susceptibility using terrain features - application to Alta Val Badia, Italian Dolomites. *Geomorphology*, 66(1-4): 305-325.
- Gianinetto, M. und Scaioni, M., 2008. Automated geometric correction of high-resolution pushbroom satellite data. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 74(1): 107-116.
- Graham, D.S., 1985. Remote-Sensing in Meteorology, Oceanography and Hydrology. *Professional Geographer*, 37(1): 112-113.
- Green, R.O., Dozier, J., Roberts, D. und Painter, T., 2002. Spectral snow-reflectance models for grain-size and liquid-water fraction in melting snow for the solar-reflected spectrum. *Annals of Glaciology*, Vol 34, 2002, 34: 71-73.

- Gruber, U., 2001. Using GIS for avalanche hazard mapping in Switzerland, ESRI International User Conference, San Diego, USA.
- Gruber, U. und Bartelt, P., 2007. Snow avalanche hazard modelling of large areas using shallow water numerical methods and GIS. *Environmental Modelling & Software*, 22(10): 1472-1481.
- Gruen, A. und Baltsavias, E., 1987. High Precision Image Matching for Digital Terrain Model Generation. *Photogrammetria*, 42(3): 97 - 112.
- Guha-Sapir, D. und Below, R., 2006. Collecting data on disasters: Easier said than done. *Asian Disaster Management News*, 12(2): 9 - 10.
- Guha-Sapir, D., Hargitt, D. und Hoyois, P., 2004. Thirty years of natural disasters 1974 - 2003: The numbers, Centre for Research on the Epidemiology of Disasters, Louvaine-la Neuve.
- Guisard, A., 1993. Directional Spectrum of the Sea-Surface and Wind Scatterometry. *International Journal of Remote Sensing*, 14(8): 1615-1633.
- Gupta, R.P., Haritashya, U.K. und Singh, P., 2005. Mapping dry/wet snow cover in the Indian Himalayas using IRS multispectral imagery. *Remote Sensing of Environment*, 97(4): 458-469.
- Haefner, H., Seidel, K. und Ehrler, H., 1997. Applications of snow cover mapping in high mountain regions. *Physics and Chemistry of The Earth*, 22(3-4): 275-278.
- Hall, D.K. und Martinec, J., 1985. *Remote Sensing of Ice and Snow*. Chapman Hall, New York, 189 pp.
- Haralick, R., Shanmugam, K. und Dinstein, I., 1973. Textural Features for Image Classification. *Systems, Man and Cybernetics, IEEE Transactions on*, 3(6): 610-621.
- Haralick, R.M., 1973. Glossary and Index to Remotely Sensed Image Pattern-Recognition Concepts. *Pattern Recognition*, 5(4): 391-403.
- Haralick, R.M., 1979. Statistical and Structural Approaches to Texture. *Proceedings of the IEEE*, 67(5): 786-804.
- Härdle, W. und Simar, L., 2007. *Applied Multivariate Statistical Analysis*. Springer, Berlin, 486 pp.
- Harms, H., Gunzer, U. und Aus, H.M., 1986. Combined Local Color and Texture Analysis of Stained Cells. *Computer Vision Graphics and Image Processing*, 33(3): 364-376.
- Harvey, S. und Zweifel, B., 2008. New trends of recreational avalanche accidents in Switzerland, ISSW International Snow Science Workshop, Whistler, BC, CA.
- Henry, J.-B., Chastanet, P., Fellah, K. und Desnos, Y.-L., 2003. Envisat Multi-Polarised ASAR Data for Flood Mapping, SERTTT, Strassbourg.
- Hodgson, M.E., 1998. What size window for image classification? A cognitive perspective. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 64(8): 797-807.
- Hollaus, M., Wagner, W., Eberhofer, C. und Karel, W., 2006. Accuracy of large-scale canopy heights derived from LiDAR data under operational constraints in a complex alpine environment. *Isprs Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 60(5): 323-338.

- Hore, A., Ziou, D. und Deschenes, F., 2007. A New Image Scaling Algorithm Based on the Sampling Theorem of Papoulis and Application to Color Images,, Fourth International Conference on Image and Graphics ICIG 2007, pp. 39-44.
- Huber, S., Kneubühler, M., Psomas, A., Itten, K. und Zimmermann, N.E., 2008. Estimating foliar biochemistry from hyperspectral data in mixed forest canopy. *Forest Ecology and Management*, 256(3): 491-501.
- Huggel, C., Kaab, A., Haeberli, W., Teyssie, P. und Paul, F., 2002. Remote sensing based assessment of hazards from glacier lake outbursts: a case study in the Swiss Alps. *Canadian Geotechnical Journal*, 39(2): 316-330.
- ISDR, 2005. 2005 disasters in numbers. International Strategy for Disaster Reduction. <http://www.unisdr.org/disaster-statistics/introduction.htm> (Zugriff: 25. 11. 2005).
- Jamieson, J.B. und Schweizer, J., 2000. Texture and strength changes of buried surface-hoar layers with implications for dry snow-slab avalanche release. *Journal of Glaciology*, 46(152): 151-160.
- Jenne, P., 1989. Lawinen im Luftbild. Diplomarbeit Thesis, University of Zurich, Zurich.
- Jomelli, V. und Bertran, P., 2001. Wet snow avalanche deposits in the French Alps: Structure and sedimentology. *Geografiska Annaler*, 83(1-2): 15 - 28.
- Jordi, B., 2007. Es gibt keine absolute Sicherheit. *UMWELT*, 07(2): 6 - 10.
- Ju, J.C. und Roy, D.P., 2008. The availability of cloud-free Landsat ETM plus data over the conterminous United States and globally. *Remote Sensing of Environment*, 112(3): 1196-1211.
- Julesz, B., 1962. Visual Pattern Discrimination. *IRE Transactions on Information Theory*, 8: 84 - 92.
- Kääb, A. et al., 2005. Remote sensing of glacier- and permafrost-related hazards in high mountains: an overview. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 5(4): 527-554.
- Karathanassi, V., Iossifidis, C. und Rokos, D., 2000. A texture-based classification method for classifying built areas according to their density. *International Journal of Remote Sensing*, 21(9): 1807-1823.
- Kayitakire, F., Hamel, C. und Defourny, P., 2006. Retrieving forest structure variables based on image texture analysis and IKONOS-2 imagery. *Remote Sensing of Environment*, 102(3-4): 390-401.
- Kelkar, R., 2007. Satellite Meteorology. BS Publications, Hyderabad.
- Kellenberger, T. und Nagy, P., 2008. Potential of the ADS40 aerial scanner for archaeological prospection in Rheinau, Switzerland, ISPRS Congress, Beijing, China, pp. 1871 - 1878.
- Kellenberger, T.W., 1996. Erfassung der Waldfläche in der Schweiz mit multispektralen Satellitenbilddaten. PhD Thesis Thesis, University of Zurich UZH, Zurich.
- Kneubühler, M., 2002. Spectral Assessment of Crop Phenology Based on spring Wheat and Winter Barley. PhD Thesis, University of Zurich UZH, Zurich, 147 pp.
- Kokaly, R.F. und Clark, R.N., 1999. Spectroscopic determination of leaf biochemistry using band-depth analysis of absorption features and stepwise multiple linear regression. *Remote Sensing of Environment*, 67(3): 267-287.

- Kokaly, R.F., Despain, D.G., Clark, R.N. und Livo, K.E., 2003. Mapping vegetation in Yellowstone National Park using spectral feature analysis of AVIRIS data. *Remote Sensing of Environment*, 84(3): 437-456.
- Koskinen, J. et al., 1999. Snow Monitoring Using Radar and Optical Satellite Data. *Remote Sensing of Environment*, 69(1): 16-29.
- Kramer, H.J., 2002. *Observation of the Earth and its Environment. survey of missions and sensors.* Springer, 1510 pp.
- Krieger, G. et al., 2007. TanDEM-X: A satellite formation for high-resolution SAR interferometry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 45(11): 3317-3341.
- Kuplich, T.M., Curran, P.J. und Atkinson, P.M., 2005. Relating SAR image texture to the biomass of regenerating tropical forests. *International Journal of Remote Sensing*, 26(21): 4829-4854.
- Kusumo, B. et al., 2008. The use of diffuse reflectance spectroscopy for in situ carbon and nitrogen analysis of pastoral soils. *Australian Journal of Soil Research*, 46: 623-635.
- Laternser, M., Lentner, S., Meister, R., Schneebeli, M. und Utelli, H., 1995. Dokumentation zur Schadenlawinen-Datenbank (SLDB), Eidgenössisches Institut für Schnee- und Lawinenforschung.
- Laternser, M. und Schneebeli, M., 2002. Temporal Trend and Spatial Distribution of Avalanche Activity during the Last 50 Years in Switzerland *Natural Hazards*, 27(3): 201–230.
- Lee, J.H. und Philpot, W.D., 1991. Spectral Texture Pattern-Matching - a Classifier for Digital Imagery. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 29(4): 545-564.
- Lehning, M. und Fierz, C., 2008. Assessment of snow transport in avalanche terrain. *Cold Regions Science and Technology*, 51(2-3): 240-252.
- Leica, 2008. Leica Geosystems. www.leica-geosystems.com (Zugriff: 22. 09. 2008).
- Leroux, C., Deuze, J.-L., Goloub, P., Sergeant, C. und Fily, M., 1998. Ground measurements of the polarized bidirectional reflectance of snow in the near-infrared spectral domain: Comparisons with model results. *Journal of Geophysical Research*, 103(D16): 19721 - 19732.
- Leroux, C. und Fily, M., 1998. Modeling the effect of sastrugi on snow reflectance. *Journal of Geophysical Research*, 103(E11): 25779 - 25788.
- Lillesand, T.M. und Kiefer, R.W., 2000. *Remote sensing and image interpretation.* John Wiley & Sons, New York, 724 pp.
- Liu, Q.J., Li, X.R., Ma, Z.Q. und Takeuchi, N., 2005. Monitoring forest dynamics using satellite imagery - a case study in the natural reserve of Changbai Mountain in China. *Forest Ecology and Management*, 210(1-3): 25-37.
- Lucht, S., 2004. Viewing the Earth from multiple angles: Global change and the science of multiangular reflectance. In: M. Schoenermark, B. Geiger and H.P. Roeser (Editors), *Reflection Properties of Vegetation and Soil.* Wissenschaft und Technik Verlag, Berlin, pp. 9 - 30.

- Lutz, E., Birkeland, K.W., Kronholm, K., Hansen, K. und Aspinall, R., 2007. Surface hoar characteristics derived from a snow micropenetrometer using moving window statistical operations. *Cold Regions Science and Technology*, 47(1-2): 118-133.
- Maggioni, M., 2005. Avalanche Release Areas and Their Influence on Uncertainty in Avalanche Hazard Mapping. PhD Thesis, University of Zurich, Zurich, 140 pp.
- Maggioni, M. und Gruber, U., 2003. The influence of topographic parameters on avalanche release dimension and frequency. *Cold Regions Science and Technology*, 37(3): 407-419.
- Maggioni, M., Gruber, U. und Stoffel, A., 2002. Definition and characterisation of potential avalanche release areas, ESRI International User Conference, San Diego, US, pp. 1161 - 1166.
- Mallat, S.G., 1989. A Theory for Multiresolution Signal Decomposition - the Wavelet Representation. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 11(7): 674-693.
- Mantovani, F., Soeters, R. und Van Westen, C.J., 1996. Remote sensing techniques for landslide studies and hazard zonation in Europe. *Geomorphology*, 15(3-4): 213-225.
- Marceau, D.J., Howarth, P.J., Dubois, J.M.M. und Gratton, D.J., 1990. Evaluation of the Gray-Level Cooccurrence Matrix-Method for Land-Cover Classification Using Spot Imagery. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 28(4): 513-519.
- Markus, T., Powell, D.C. und Wang, J.R., 2006. Sensitivity of passive microwave snow depth retrievals to weather effects and snow evolution. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 44(1): 68-77.
- Marshall, H.P., Schneebeli, M. und Koh, G., 2007. Snow stratigraphy measurements with high-frequency FMCW radar: Comparison with snow micro-penetrometer. *Cold Regions Science and Technology*, 47(1-2): 108-117.
- Matzl, M. und Schneebeli, M., 2006. Measuring specific surface area of snow by near-infrared photography. *Journal of Glaciology*, 52(179): 558-564.
- McClung, D.M., 2001. Characteristics of terrain, snow supply and forest cover for avalanche initiation caused by logging. *Annals of Glaciology*, Vol 32, 2001, 32: 223-229.
- McClung, D.M. und Schaerer, P., 2006. *The Avalanche Handbook*. The Mountaineers Books, Seattle, 342 pp.
- Mehrotra, K.G., Johnson, R.A. und Bhattacharyya, G.K., 1977. Locally Most Powerful Rank-Tests for Multiple-Censored Data. *Communications in Statistics Part a-Theory and Methods*, 6(5): 459-469.
- MeteoSchweiz, 2008a. SwissMetNet – Das neue meteorologische Messnetz der MeteoSchweiz. Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie.
- MeteoSchweiz, 2008b. Wetterradar, Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie.
- Metternich, G., Hurni, L. und Gogu, R., 2005. Remote sensing of landslides: An analysis of the potential contribution to geo-spatial systems for hazard assessment in mountainous environments. *Remote Sensing of Environment*, 98(2-3): 284-303.

- Michaux, J.L., Naaïm-Bouvet, F. und Naaïm, M., 2000. Drifting snow on a mountain site: measurements and numerical modelling at avalanche path scale. *Houille Blanche-Revue Internationale De L Eau*(5): 63-69.
- Middleton, W.F.K. und Mungall, A.G., 1952. The Luminous Directional Reflectance of Snow. *Journal of the Optical Society of America*, 42(8): 572-579.
- Mognard, N.M. et al., 1991. Simultaneous Observations of Ocean Surface Winds and Waves by Geosat Radar Altimeter and Airborne Synthetic Aperture Radar during the 1988 Norwegian Continental-Shelf Experiment. *Journal of Geophysical Research-Oceans*, 96(C6): 10467-10486.
- Mondet, J. und Fily, M., 1999. The reflectance of rough snow surfaces in Antarctica from POLDER/ADEOS remote sensing data. *Geophys. Res. Lett.*, 26: 3477 - 3480.
- MunichRe, 2008. *Topics Geo, Naturkatastrophen 2007, Analysen, Bewertungen, Positionen, Münchener Rückversicherungs-Gesellschaft.*
- Munter, W., 2003. *3 x 3 Lawinen: Entscheiden in kritischen Situationen.* Verlag Phol und Schellhammer, Garmisch-Partenkirchen, 224 pp.
- Mushkin, A. und Gillespie, A.R., 2005. Estimating sub-pixel surface roughness using remotely sensed stereoscopic data. *Remote Sensing of Environment*, 99(1-2): 75-83.
- Nichol, J. und Wong, M.S., 2005. Satellite remote sensing for detailed landslide inventories using change detection and image fusion. *International Journal of Remote Sensing*, 26(9): 1913 - 1926.
- Nicodemus, F.E., 1970. Reflectance Nomenclature and Directional Reflectance and Emissivity. *Applied Optics*, 9(6): 1474-1475.
- Nicodemus, F.E., Ginsberg, I.W. und Limperis, T., 1977. Geometrical considerations and nomenclature for reflectance, National Bureau of Standards, Washington, D. C.
- Nolin, A.W. und Dozier, J., 1993. Estimating snow grain size using AVIRIS data. *Remote Sensing of Environment*, 44(2-3): 231-238.
- Nolin, A.W. und Dozier, J., 2000. A Hyperspectral Method for Remotely Sensing the Grain Size of Snow. *Remote Sensing of Environment*, 74(2): 207-216.
- Nolin, A.W., Fetterer, F.M. und Scambos, T.A., 2002. Surface roughness characterizations of sea ice and ice sheets: Case studies with MISR data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 40(7): 1605-1615.
- Nolin, A.W. und Payne, M.C., 2007. Classification of glacier zones in western Greenland using albedo and surface roughness from the Multi-angle Imaging SpectroRadiometer (MISR). *Remote Sensing of Environment*, 107(1-2): 264-275.
- Nöthiger, C., 2003. *Naturgefahren und Tourismus in den Alpen: untersucht am Lawinenwinter 1999 in der Schweiz.* PhD Thesis, Universität Zürich UZH, Zürich, 245 pp.
- Nöthiger, C. und Elsasser, H., 2004. Natural hazards and tourism: New findings on the European Alps. *Mountain Research and Development*, 24(1): 24-27.
- OcCC/ProClim, 2007. *Klimaänderung und die Schweiz 2050 - Erwartete Auswirkungen auf Umwelt, Gesellschaft und Wirtschaft.*

- Oppenheim, A. und Schaeffer, R., 1975. Digital Signal Processing. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N. J., 577 pp.
- Oruc, M., Marangoz, A. und Buyuksalih, G., 2004. Comparison of Pixel-based and Object-oriented Classification Approaches Using Landsat-7 Etm Spectral Bands, XXth ISPRS Congress, Commission 4, Istanbul, Turkey, pp. 1118 - 1126.
- Painter, T.H., 2002. The hyperspectral bidirectional reflectance of snow: modeling, measurement and instrumentation, University of California, Santa Barbara, 289 pp.
- Painter, T.H., Dozier, J., Roberts, D.A., Davis, R.E. und Green, R.O., 2003. Retrieval of subpixel snow-covered area and grain size from imaging spectrometer data. Remote Sensing of Environment, 85(1): 64-77.
- Painter, T.H. et al., 2001. Detection and Quantification of Snow Algae with an Airborne Imaging Spectrometer. Appl. Environ. Microbiol., 67(11): 5267-5272.
- PCI, 2005. PCI Geomatica User Guide. In: P.G.E. Inc. (Editor). PCI Geomatics Enterprises Inc., Richmond Hill, CA.
- Pearson, K., 1901. On Lines and Planes of Closest Fit to Systems of Points in Space. Philosophical Magazine, 2(6): 559 - 572.
- Peltoniemi, J.I., Kaasalainen, S., Naranen, J., Matikainen, L. und Piironen, J., 2005. Measurement of directional and spectral signatures of light reflectance by snow. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 43(10): 2294-2304.
- Pesaresi, M., 2000. Texture Analysis for Urban Pattern Recognition Using Fine-resolution Panchromatic Satellite Imagery. Geographical and Environmental Modelling, 4(1): 43 - 63.
- Pickett, R.M., 1970. Visual analyses of texture in the detection and recognition of objects. Picture Processing and Psychopictorics. Academic Press, New York.
- Pielmeier, C., Schneebeli, M. und Stucki, T., 2001. Snow texture: a comparison of empirical versus simulated texture index for Alpine snow. Annals of Glaciology, Vol 32, 2001, 32: 7-13.
- PLANAT, 2006. Natural Hazards in Switzerland. <http://www.planat.ch/> (Zugriff: 13. 03. 2006).
- Pouliot, D.A., King, D.J. und Pitt, D.G., 2006. Automated assessment of hardwood and shrub competition in regenerating forests using leaf-off airborne imagery. Remote Sensing of Environment, 102(3-4): 223-236.
- Press, F. und Siever, R., 2003. Allgemeine Geologie. Spektrum Akademischer Verlag, Berlin.
- PREVIEW, 2008. Earth Observation Satellites & Sensors for Risk Management. FP6, CNES.
- Proisy, C., Coutron, P. und Fromard, F., 2007. Predicting and mapping mangrove biomass from canopy grain analysis using Fourier-based textural ordination of IKONOS images. Remote Sensing of Environment, 109(3): 379-392.
- Rango, A. und Itten, K.I., 1976. Satellite Potentials in Snowcover Monitoring and Runoff Prediction. Nordic Hydrology, 7: 209 - 230.
- Rees, G.W., 2006. Remote Sensing of Snow and Ice. CRC Press Taylor & Francis Group.

- Rey, S., 2008. Spektrodirektionale Charakterisierung von Schnee. M Sc Thesis, Universität Zürich, Zürich, 119 pp.
- Rhyner, J. et al., 2002. Avalanche warning Switzerland - consequences of the avalanche winter 1999, International Snow Science Workshop ISSW, Penticton, B.C., USA.
- Richards, J.A., 1993. Remote Sensing Digital Image Analysis. Springer, Heidelberg, New York, 439 pp.
- Richter, J.P., 1970. The Notebooks of Leonardo da Vinci, I. Dover Publ. Inc., New York, 367 pp.
- Rohrbach, A., 2006. ADS40 - 2nd generation Airborne Digital Sensor, MARS PAC Conference, Toulouse, FR.
- Russi, T., Ammann, W.J., Brabec, B., Lehning, M. und Meister, R., 2003. Avalanche Warning Switzerland 2000. In: J. Zschau and A. Küppers (Editors), Early Warning Systems for Natural Disaster Reduction. Springer, Berlin Heidelberg New York, pp. 569 - 577.
- Sali, E. und Wolfson, H., 1992. Texture Classification in Aerial Photographs and Satellite Data. International Journal of Remote Sensing, 13(18): 3395-3408.
- Salm, B., Burkhard, A. und Gubler, H.U., 1990. Berechnung von Fließlawinen. Eine Anleitung für den Praktiker mit Beispielen, Eidg. Institut für Schnee- und Lawinenforschung SLF, Davos.
- Sampl, P. und Zwinger, T., 2004. Avalanche simulation with SAMOS. Annals of Glaciology, 38: 393-398.
- Sandau, R., 2005. Digitale Luftbildkamera - Einführung und Grundlagen. Wichmann, Heidelberg.
- Sandmeier, S., 2004. Spectral BRDF. In: M. Schoenermark, B. Geiger and H.P. Roeser (Editors), Reflection Properties of Vegetation and Soil, pp. 131 - 146.
- Saunders, R.W. und Seguin, B., 1992. Meteorology and Climatology. International Journal of Remote Sensing, 13(6-7): 1231-1259.
- Savitzky, A. und Golay, M.J.E., 1964. Smoothing and Differentiation of Data by Simplified Least Squares Procedures. Analytical Chemistry, 36(8): 1627-1639.
- Schaepman, M.E., 2007. Spectrodirectional remote sensing: From pixels to processes. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 9(2): 204 - 223.
- Schaepman-Strub, G., Schaepman, M., Martonchik, J., Painter, T.H. und Dangel, S., 2009. Radiometry and Reflectance: From Terminology Concepts to Measured Quantities. In: T.A. Warner, D.N. Nellis and G. Foody (Editors), The SAGE Handbook of Remote Sensing. SAGE Publications Ltd, pp. 213 - 226.
- Schaepman-Strub, G., Schaepman, M.E., Painter, T.H., Dangel, S. und Martonchik, J.V., 2006. Reflectance quantities in optical remote sensing-definitions and case studies. Remote Sensing of Environment, 103(1): 27-42.
- Schaerer, P.A., 1977. Analysis of Snow Avalanche Terrain. Canadian Geotechnical Journal, 14(3): 281-287.
- Schaffhauser, A. et al., 2008. Remote sensing based retrieval of snow cover properties. Cold Regions Science and Technology, 54: 164 - 175.

- Schanda, E., Matzler, C. und Kunzi, K., 1983. Microwave remote sensing of snow cover. *International Journal of Remote Sensing*, 4(1): 149 - 158.
- Scheuner, T., 2007. Modellierung von Murgangereignissen mit RAMMS und Vergleich durch GIS-basiertes Fließmodell, Universität Zürich, Zurich.
- Schmidt, K.S. und Skidmore, A.K., 2003. Spectral discrimination of vegetation types in a coastal wetland. *Remote Sensing of Environment*, 85: 92-108.
- Schneebeli, M., Pielmeier, C. und Johnson, J.B., 1999. Measuring snow microstructure and hardness using a high resolution penetrometer. *Cold Regions Science and Technology*, 30(1-3): 101-114.
- Schopfer, J., 2008. Spectrodirectional ground-based remote sensing using dual-view goniometry : field BRF retrieval and assessment of the diffuse irradiance distribution in spectrodirectional field measurements. PhD Thesis, University of Zurich, Zurich, 93 pp.
- Schweizer, D.J. und Jamieson, J.B., 2001. Snow cover properties for skier triggering of avalanches. *Cold Regions Science and Technology*, 33(2 - 3): 207 - 221.
- Schweizer, J. und Föhn, P.M.B., 1996. Avalanche forecasting - An expert system approach. *Journal of Glaciology*, 42(141): 318-332.
- Schweizer, J., Kronholm, K., Jamieson, J.B. und Birkeland, K.W., 2008. Review of spatial variability of snowpack properties and its importance for avalanche formation. *Cold Regions Science and Technology*, 51(2-3): 253-272.
- Schweizer, J., Kronholm, K. und Wiesinger, T., 2003. Verification of regional snowpack stability and avalanche danger. *Cold Regions Science and Technology*, 37(3): 277-288.
- Seidel, K., Martinec, J., Steinmeier, C. und Bruesch, W., 1993. Remote Sensing of Snow Cover for Operational Forecasts, International Symposium "Operationalization of Remote Sensing", Enschede, The Netherlands.
- Sharma, S., Mathur, P. und Snehmani, 2004. Change detection analysis of avalanche snow in Himalayan region using near infrared and active microwave images. *Advances in Space Research*, 33: 259 - 267.
- Shi, J. und Dozier, J., 2000a. Estimation of snow water equivalence using SIR-C/X-SAR. I. Inferring snow density and subsurface properties. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 38(6): 2465-2474.
- Shi, J. und Dozier, J., 2000b. Estimation of snow water equivalence using SIR-C/X-SAR. II. Inferring snow depth and particle size. *Ieee Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 38(6): 2475-2488.
- Simmen, J.-L. und Bovet, S., 2007. Landesweites Orthophoto dank der Digitalkamera ADS40. *Geomatik Schweiz*, 2007(6): 293 - 296.
- Singh, K.P., Singh, D., Sharma, S.K. und Mukherjee, P.K., 1995. Remote-Sensing of Earths Surface-Roughness at Microwave Frequency. *Satellite Monitoring of the Earth's Surface and Atmosphere*, 16(10): 189-192.
- SLF, 1951 - 2007. Winterberichte: Schnee und Lawinen in den Schweizer Alpen, Winter 1949/50 bis 1998/99, Eidgenössisches Institut für Schnee- und Lawinenforschung.

- SLF, 2000. Der Lawinenwinter 1999. Eidgenössisches Institut für Schnee- und Lawinenforschung, Davos.
- SLF, 2002. Interkantonales Frühwarn- und Kriseninformationssystem (IFKIS). Eidgenössisches Institut für Schnee- und Lawinenforschung. <http://www.slf.ch/lwr/risikomanagement/ifkis-de.html> (Zugriff: 24. 07. 2008).
- SLF, 2008a. SLF-Beobachterhandbuch: Regionale Beobachter, Hangprofiler, Geländebeobachter. WSL-Institut für Schnee- und Lawinenforschung SLF (HRSG), Davos, 96 pp.
- SLF, 2008b. WinterAktuell. WSL-Institut für Schnee- und Lawinenforschung SLF. <http://wa.slf.ch> (Zugriff: 23. 09. 2008).
- SLF, 2009a. Beschreibung der Lawinengrösse. WSL-Institut für Schnee- und Lawinenforschung SLF. http://www.slf.ch/lawineninfo/zusatzinfos/interpretationshilfe/lawinengefahrenbegriffe/europaeische_skala/index_DE (Zugriff: 12. 01. 2009).
- SLF, 2009b. Glossar Schnee und Lawinen. WSL-Institut für Schnee- und Lawinenforschung SLF. <http://waarchiv.slf.ch/index.php?id=118> (Zugriff: 08. 01. 2009).
- Soh, L.K. und Tsatsoulis, C., 1999. Texture analysis of SAR sea ice imagery using gray level co-occurrence matrices. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 37(2): 780-795.
- Sovilla, B., Margreth, S. und Bartelt, P., 2007. On snow entrainment in avalanche dynamics calculations. *Cold Regions Science and Technology*, 47(1-2): 69-79.
- Straub, D. und Gret-Regamey, A., 2006. A Bayesian probabilistic framework for avalanche modelling based on observations. *Cold Regions Science and Technology*, 46(3): 192 - 203.
- Stroeve, J.C. und Nolin, A.W., 2002. New methods to infer snow albedo from the MISR instrument with applications to the Greenland ice sheet. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 40(7): 1616-1625.
- Strozzi, T. und Mätzler, C., 1998. Backscattering measurements of alpine snowcovers at 5.3 and 35 GHz. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 36(3): 838-848.
- Su, W. et al., 2008. Textural and local spatial statistics for the object-oriented classification of urban areas using high resolution imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 29(11): 3105 - 3117.
- Sutton, R.N. und Hall, E.L., 1972. Texture Measures for Automatic Classification of Pulmonary-Disease. *IEEE Transactions on Computers*, C 21(7): 667-676.
- SwissRe, 2007. Natur- und Man-made-Katastrophen im Jahr 2006, Schweizerische Rückversicherungsgesellschaft, Zurich.
- swisstopo, 2005a. DHM25 Das digitale Höhenmodell der Schweiz, Bundesamt für Landestopographie.
- swisstopo, 2005b. DTM-AV, Bundesamt für Landestopographie, Eidgenössisches Departement für Verteidigung, Bevölkerungsschutz und Sport VBS.
- swisstopo, 2008. Formeln und Konstanten für die Berechnung der Schweizerischen schiefachsigen Zylinderprojektion und der Transformation zwischen Koordinatensystemen, Bundesamt für

- Landestopographie, Eidgenössisches Departement für Verteidigung, Bevölkerungsschutz und Sport VBS.
- Tamura, H., Mori, S. und Yamawaki, T., 1978. Textural Features Corresponding to Visual Perception. Systems, Man and Cybernetics, IEEE Transactions on, 8(6): 460 - 473.
- Tanikawa, T., Aoki, T. und Nishio, F., 2002. Remote sensing of snow grain-size and impurities from Airborne Multispectral Scanner data using a snow bidirectional reflectance distribution function model. Annals of Glaciology, 34: 74-80.
- Tanner, C. und Föhn, P., 1999. Thermografie im Schnee. Die Alpen(6): 30 - 33.
- Tarble, R.D., 1963. Areal distributions of snow as determined from satellite photographs International Association of Hydrological Sciences Special Publication, 65: 372 - 375.
- Tralli, D.M., Blom, R.G., Zlotnicki, V., Donnellan, A. und Evans, D.L., 2005. Satellite remote sensing of earthquake, volcano, flood, landslide and coastal inundation hazards. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 59(4): 185-198.
- Treichler, D., 2009. Spektrale Differenzierung von Schnee und Lawinen. M Sc Thesis, University of Zurich UZH.
- Treichler, D., Bühler, Y., Hüni, A., Kneubühler, M. und Itten, K.I., 2009. Spectral Discrimination of Avalanche Deposits, 6th EARSeL SIG Workshop: Imaging Spectroscopy, Tel Aviv, Israel.
- Tsai, F. und Chou, M.J., 2006. Texture augmented analysis of high resolution satellite imagery in detecting invasive plant species. Journal of the Chinese Institute of Engineers, 29(4): 581-592.
- Tsai, F., Lin, E.K. und Yoshino, K., 2007. Spectrally segmented principal component analysis of hyperspectral imagery for mapping invasive plant species. International Journal of Remote Sensing, 28(5): 1023-1039.
- Tschirky, F., Brabec, B. und Kern, M., 2000. Lawinenunfälle in den Schweizer Alpen - eine statistische Zusammenstellung mit den Schwerpunkten Verschüttung, Rettungsmethoden und Rettungsgeräte, Eidg. Institut für Schnee- und Lawinenforschung, Davos, GR.
- Tuceryan, M. und Jain, A., 1998. The Handbook of Pattern Recognition and Computer Vision. World Scientific Publishing Co.
- Tuttle, E.M., Jensen, R.R., Formica, V.A. und Gonser, R.A., 2006. Using remote sensing image texture to study habitat use patterns: a case study using the polymorphic white-throated sparrow (*Zonotrichia albicollis*). Global Ecology and Biogeography, 15(4): 349-357.
- UNESCO, 1981. Avalanche Atlas, Paris, 265 pp.
- Unser, M., 1986. Sum and Difference Histograms for Texture Classification. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 8(1): 118-125.
- Vallet, J., Skaloud, J., Koelbl, O. und Merminod, B., 2000. Development of a Helicopter-Based Integrated System for Avalanche Mapping and Hazard Management. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 33: 565 - 572.

- VKF, 2009. Elementarschäden an Gebäuden. Kantonale Gebäudeversicherungen, Vereinigung Kantonaler Feuerversicherungen. <http://www.kgvonline.ch/> (Zugriff: 08. 01. 2009).
- Voellmy, A., 1955. Über die Zerstörungskraft von Lawinen. Schweizer Bauzeitung, 73: 159 - 285.
- Wahl, F.M., Wong, K.Y. und Casey, R.G., 1982. Block Segmentation and Text Extraction in Mixed Text Image Documents. Computer Graphics and Image Processing, 20(4): 375-390.
- Wang, D. und Srihari, S.N., 1989. Classification of Newspaper Image Blocks Using Texture Analysis. Computer Vision Graphics and Image Processing, 47(3): 327-352.
- Warren, S., 1982. Optical Properties of Snow. Reviews of Geophysics and Space Physics, 20: 67 - 89.
- Warren, S. und Wiscombe, W., 1980. A Model for the Spectral Albedo of Snow. II: Snow Containing Atmospheric Aerosols. Journal of Atmospheric Science, 37(12): 2734-2745.
- Warren, S.G., Brandt, R. und Hinton, P., 1998. Effect of surface roughness on bidirectional reflectance of Antarctic snow. Journal of Geophysical Research, 103(25): 25789 - 25808.
- Waser, L.T. et al., 2008. Assessing changes of forest area and shrub encroachment in a mire ecosystem using digital surface models and CIR aerial images. Remote Sensing of Environment, 112(5): 1956-1968.
- Weeks, R., Smith, M., Pak, K. und Gillespie, A., 1997. Inversions of SIR-C and AIRSAR data for the roughness of geological surfaces. Remote Sensing of Environment, 59(2): 383-396.
- Werner, M., 2001. Shuttle radar topography mission (SRTM) mission overview. Frequenz, 55(3-4): 75-79.
- Wiesinger, T. und Adams, M., 2008. Schnee und Lawinen in den Schweizer Alpen Winter 1998/1999, Eidgenössisches Institut für Schnee- und Lawinenforschung SLF, Davos.
- Wiesmann, A., Wegmüller, U., Honikel, M., Strozzi, T. und Werner, C., 2001. Potential and methodology of satellite based SAR for hazard mapping, Proceedings of IGARSS 2001, Seattle, Australia.
- Wilcoxon, F., 1945. Individual Comparisons by Ranking Methods. Biometrics Bulletin, 1(6): 80-83.
- Wiman, H., 1998. Automatic generation of digital surface models through matching in object space. Photogrammetric Record, 16(91): 83-91.
- Wiscombe, W. und Warren, S., 1980. A model for the spectral albedo of snow I. Pure snow. Journal of Atmospheric Science, 37: 2712 - 2733.
- Wisner, B., Blaikie, P., Cannon, T. und Davis, I., 2004. At Risk - Natural hazards, people's vulnerability and disasters. Routledge, New York, 471 pp.
- Woodell, G., Jobson, D.J., Rahman, Z.U. und Hines, G., 2006. Advanced image processing of aerial imagery - art. no. 62460E. Visual Information Processing XV, 6246: E2460-E2460 290.
- Yan, G., Mas, J.-F., Maathuis, B., Xiangmin, Z. und P., V.D., 2006. Comparison of pixel-based and object-oriented image classification approaches—a case study in a coal fire area, Wuda, Inner Mongolia, China. International Journal of Remote Sensing, 27(18): 4039 - 4055.

- Zebker, H.A. und Goldstein, R.M., 1986. Topographic Mapping from Interferometric Synthetic Aperture Radar Observations. *Journal of Geophysical Research-Solid Earth and Planets*, 91(B5): 4993-4999.
- Zhang, J., Zhou, C., Xu, K. und Watanabe, M., 2002. Flood disaster monitoring and evaluation in China. *Environmental Hazards*, 4 33 - 43.
- Zhang, L., 2005. Automatic Digital Surface Model (DSM) Generation from Linear Array Images. PhD Thesis, Swiss Federal Institute of Technology Zurich ETHZ.

Curriculum Vitae

Name	Yves Alexander Bühler
Geburtsdatum	08. April 1978 in Winterthur
Heimatort und Kanton	Adliswil ZH
Sept. 2005 – Sept. 2009	Doktorarbeit Remote Sensing Laboratories RSL, Geographisches Institut, Universität Zürich zum Thema „Automatisierte Erkennung und Kartierung von Lawinenablagerungen mit optischen Fernerkundungsdaten“
Oct. 2003 – Sept. 2005	Diplom für das Höhere Lehramt Mittelschule Universität Zürich (HLM Geographie)
Oct. 1998 – Feb. 2004	Diplom in Geographie Geographisches Institut, Universität Zürich. Titel der Diplomarbeit: „Change Detection Nordostschweiz“, Nebenfächer: Umweltwissenschaften & Kartographie
Aug. 1991 – Jan. 1998	Matura Typ B Kantonsschule Rychenberg Winterthur

Publikationen

2009

- Bühler, Y.**, Hüni, A., Christen, M., Meister, R. and Kellenberger, T. (2009). Automated detection and mapping of avalanche deposits using airborne optical remote sensing data. *Cold Regions Science and Technology*, 57(2): 99 – 106
- Bühler, Y.**, Hüni, A., Kellenberger, T. W. and Itten, K. I. (2009). Towards an automated detection of avalanche deposits using their directional properties. In: 6th EARSeL SIG IS workshop on: "Imaging Spectroscopy: innovative tool for scientific and commercial environmental applications", Tel Aviv, Israel, 16 March 2009 - 19 March 2009
- Bühler, Y.**, Hüni, A., Christen, M., Meister, R. and Kellenberger, T. (2009). Automated detection and mapping of rough snow surfaces including avalanche deposits using airborne remote sensing. In: International Snow Science Workshop, Davos, Switzerland, 28 September – 02 October
- Forster, D., **Buehler, Y.** and Kellenberger, T.W. (2009). Mapping urban and peri-urban agriculture using high spatial resolution satellite data. *Journal of Applied Remote Sensing*, 3(1): 1 – 12
- Forster, D., Kellenberger, T., **Bühler, Y.** and Lennartz, B. (2009). The potential of object-oriented land cover/land use classification for mapping divers peri-urban agriculture. *Geocarto International* (accepted)
- Treichler, D., **Bühler, Y.**, Hüni, A., Kneubühler, M. and Itten, K.I. (2009). Spectral Discrimination of Avalanche Deposits. In: 6th EARSeL SIG IS workshop on: "Imaging Spectroscopy: innovative tool for scientific and commercial environmental applications", Tel Aviv, Israel, 16 March 2009 - 19 March 2009

2008

- Itten, K. I., Dell'Endice, F., Hueni, A., Kneubühler, M., Schläpfer, D., Odermatt, D., Seidel, F., Huber, S., Schopfer, J., Kellenberger, T., **Bühler, Y.**, D'Odorico, P., Nieke, J., Alberti, E. and Meuleman, K. (2008). APEX - the hyperspectral ESA Airborne Prism Experiment. *Sensors*, 8(10):6235 - 6259

2007

- Bühler, Y.** and Kellenberger, T. W. (2007). Development of processing chains for rapid mapping with satellite data. In: Li, J; Zlatanova, S; Fabbri, A. Geomatics solutions for disaster management. Berlin, 49-60
- Bühler, Y.**, Kneubühler, M., Bovet, S. und Kellenberger, T. (2007). Anwendung von ADS40 Daten im Agrarbereich. In: Seyfert, E. DGPF Tagungsband: Dreiländertagung SGPBF, DGPF und OVG. Oldenburg, 381-390

2006

- Bühler, Y.**, Seidel, F. und Kellenberger, T. (2006). Unwetter 2005: schnelle Schadenskartierung mit Satellitendaten zur Unterstützung des Katastrophen-Managements. Geomatik Schweiz, (9):494-496
- Bühler, Y.**, Kellenberger, T. W., Small, D., and Itten, K. I. (2006). Rapid mapping with remote sensing data during flooding 2005 in Switzerland by object-based methods: a case study. In: Martin-Duque, J F [et al.]. Geoenvironment and landscape evolution II. Southampton, 391-401
- Seidel, F.C., Kellenberger, T.W. and **Bühler, Y.A.**, 2006. Satellite response to the August 2005 floods in Switzerland: Charter Call 100, In: International Disaster Reduction Conference IDRC, Davos, Switzerland, 27 August 2006 - 1 September 2006, 531 - 533